

Antonio Nigro Zamur
Lucas Saraceni Carvalho
Pedro Sylvestre Scandoleira

Projeto de Subsistema de Geração para Veículo Urbano Leve Híbrido Flex

São Paulo, SP

2023

Antonio Nigro Zamur
Lucas Saraceni Carvalho
Pedro Sylvestre Scandoleira

Projeto de Subsistema de Geração para Veículo Urbano Leve Híbrido Flex

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Sistemas de Computação e Sistemas Digitais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Engenheiro.

Universidade de São Paulo – USP

Escola Politécnica

Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais (PCS)

PCS3560 - Projeto de Formatura II

Orientador: Prof. Dr. Marco Túlio Carvalho de Andrade

Coorientadores: Prof. Dr. Armando Antonio Maria Laganá

Prof. Dr. Bruno Augusto Angélico

São Paulo, SP

2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

Zamur, Antonio

Projeto de Subsistema de Geração para Veículo Urbano Leve Híbrido Flex /
A. Zamur, L. Carvalho, P. Scandoleira -- São Paulo, 2023.

65 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais.

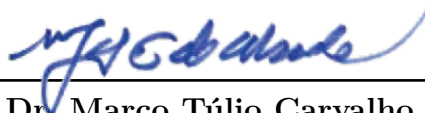
1.Veículo Híbrido Flex 2.Model-Free 3.Sistema Operacional em Tempo
Real 4.Engine Control Unit 5.Retificador Boost Interleaved I.Universidade de
São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Computação e
Sistemas Digitais II.t. III.Carvalho, Lucas IV.Scandoleira, Pedro

Antonio Nigro Zamur
Lucas Saraceni Carvalho
Pedro Sylvestre Scandoleira

Projeto de Subsistema de Geração para Veículo Urbano Leve Híbrido Flex

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao Departamento de Engenharia de Sistemas
de Computação e Sistemas Digitais da Es-
cola Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do Título de Engenheiro.

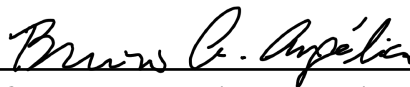
Trabalho aprovado. São Paulo, SP, 11 de dezembro de 2023:



Prof. Dr. Marco Túlio Carvalho de
Andrade
Orientador



Prof. Dr. Armando Antonio Maria
Laganá
Coorientador



Prof. Dr. Bruno Augusto Angélico
Coorientador

São Paulo, SP
2023

Este trabalho de conclusão de curso é dedicado a todos aqueles que, com seu comprometimento, contribuem para o avanço e desenvolvimento científico na sociedade.

Agradecimentos

Agradecemos aos professores orientadores Professor Dr. Armando Antonio Maria Laganá, Professor Dr. Bruno Augusto Angélico, Professor Dr. Marco Túlio Carvalho de Andrade, que nos aconselharam, guiaram e depositaram enorme confiança em nosso grupo.

Ao professor Dr. Carlos Henrique Illa Font, pelo auxílio fundamental que nos deu durante o desenvolvimento do projeto.

Aos alunos da graduação Marcos Beleza Filho, Pedro Martins de Matos e Fernando Zolubas Preto e ao mestrando Henrique Caballeria Mesquita, que nos ajudaram diretamente no desenvolvimento desse projeto.

E a todos aqueles amigos, familiares e professores que nos guiaram na jornada da graduação.

"Quem ousou conquistar e saiu
pra lutar, chega mais longe!"

– *Charlie Brown Jr.*

"O mundo não está em seus
livros e mapas. Ele está lá fora!"

– *Gandalf*

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento do subsistema geração de um veículo urbano leve híbrido flex. Ele é composto de uma unidade de combustão interna, no caso um motor Honda 250cc, um gerador trifásico acoplado ao motor e um retificador elevador de tensão. A topologia que foi trabalhada é a em série, na qual a geração é responsável por fornecer e manter constante o nível de tensão em um barramento onde todos os outros subsistemas do veículo estarão conectados, inclusive os propulsores elétricos. Estes, são os únicos responsáveis por movimentar o veículo enquanto que a unidade à combustão atua como gerador estacionário.

Este trabalho possui foco no desenvolvimento do retificador elevador de tensão, utilizando modernas ferramentas de simulação e desenvolvimento de hardware e no controle de rotação do motor à combustão, aplicando o sistema de controle Model-Free, estado da arte na área de controle digital. Ele foi implementado na forma de tarefas administradas por um Sistema Operacional em Tempo Real, executado em um microcontrolador do modelo Espressif ESP32.

Palavras-chave: VHF, veículo híbrido, Rota 2030, controle, Model-Free, válvula borboleta, RTOS, Retificador Boost Interleaved.

Abstract

The present work aims to develop the energy generation subsystem of a light hybrid flex urban vehicle. It consists of an internal combustion unit, in this case, a 250cc Honda engine, a three-phase generator coupled to the engine and a voltage boost rectifier. The chosen topology was in series, in which the energy generation is responsible for providing and maintaining a constant voltage level on a bus where all other vehicle subsystems will be connected, including the electric drives. These are solely responsible for moving the vehicle while the combustion unit acts as a stationary generator.

This work focuses on the development of the voltage boost rectifier, using modern hardware simulation and development tools and the control of the rotation of the combustion engine, applying the state-of-the-art Model-Free control system. It was implemented in the form of tasks managed by a Real-Time Operating System, running on a Espressif ESP32.

Keywords: FHV, flex-fuel hybrid vehicle, Rota 2030, control, Model-Free, butterfly valve, RTOS, boost rectifiers.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Power flow of a series hybrid electric vehicle.	24
Figura 2 – Árvore de atividades.	26
Figura 3 – Sequência de atividades.	27
Figura 4 – Escala de atividades com escrita da monografia.	28
Figura 5 – Fluxo de ar pela válvula borboleta.	30
Figura 6 – Forma de onda trifásica retificada.	31
Figura 7 – Topologia do retificador com circuito boost interleaved.	32
Figura 8 – Circuito do Retificador no PSIM	33
Figura 9 – Simulação do Retificador no PSIM	34
Figura 10 – Análise do duty cycle.	34
Figura 11 – Diagrama de Estados parcial de uma tarefa.	36
Figura 12 – Esquema de montagem	44
Figura 13 – Esquemático Altium	49
Figura 14 – Esquemático Altium	50
Figura 15 – Esquema Básico de Controle	53
Figura 16 – Esquema de Controle com Integrador	53
Figura 17 – Hierarquia Básica de Tarefas	55
Figura 18 – Diagrama da Prova de Conceito	56
Figura 19 – Detalhamento do Software	58
Figura 20 – Detalhamento do Software	58
Figura 21 – Resultados do Controle Pré Integrador	59
Figura 22 – Resultados do Controle Pós Integrador	60

Lista de tabelas

Tabela 1 – The main features and capabilities of various hybrid electric vehicles .	24
Tabela 2 – Carga horária em cada atividade.	27
Tabela 3 – Ensaio em vazio	44
Tabela 4 – Ensaio em curto circuito	45
Tabela 5 – Ensaio de desempenho	45
Tabela 6 – Ensaio de desempenho	46

Lista de abreviaturas e siglas

SENATRAN	Secretaria Nacional de Trânsito
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
ABVE	Associação Brasileira do Veículo Elétrico
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IEE	Instituto de Energia e Ambiente
MAP	Manifold Absolute Pressure Sensor
IAT	Intake Air Temperature Sensor
ECT	Engine Coolant Temperature Sensor
TPS	Throttle Position Sensor
CKP	Crankshaft Position Sensor
ECU	Engine Control Unit
PWM	Pulse Width Modulation
PID	Proportional Integral Derivative Control
PCB	Printed Circuit Board
CC	Corrente Contínua
RTOS	Real Time Operational System
ESP-IDF	Espressif IoT Development Framework
ROM	Read-only Memory
RAM	Random Access Memory

Sumário

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Motivação	23
1.2	Objetivos	24
1.3	Justificativa	25
1.4	Organização do Trabalho	25
2	ASPECTOS CONCEITUAIS	29
2.1	Sensores e Atuadores do motor à combustão.	29
2.2	Automação da válvula borboleta.	30
2.3	Retificador Trifásico com circuito Boost Interleaved.	32
2.4	Sistema de controle da Válvula Borboleta e Controle Model-Free.	34
2.5	Sistema Operacional em Tempo Real.	36
2.6	Determinação dos Pontos de Operações Ótimos do Motor a Combustão Interna.	37
3	MÉTODO DO TRABALHO	39
4	ESPECIFICAÇÃO DE REQUISITOS	41
5	DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	43
5.1	Tecnologias Utilizadas	43
5.2	Projeto e Implementação	43
5.2.1	Retificador Boost Interleaved	44
5.2.2	Implementação do Model Free	51
5.2.2.1	Estimador	51
5.2.3	Esquema de Controle	52
5.2.4	Técnicas Anti-Windup	54
5.2.5	Hierarquia de Tarefas	54
5.2.6	Prova de Conceito	55
5.2.6.1	Hardware	55
5.2.6.2	Software	56
5.3	Testes e Avaliação	58
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
6.1	Conclusões do Projeto de Formatura	59
6.2	Contribuições	61
6.3	Perspectivas de Continuidade	62

REFERÊNCIAS 65

1 Introdução

1.1 Motivação

O setor automotivo tem passado por uma constante evolução, impulsionada por avanços tecnológicos, preocupações quanto a emissões de gases poluentes e mudanças nas preferências dos consumidores. No mercado de veículos, quesitos como segurança, diminuição dos impactos ambientais e implementação de sistemas inteligentes se tornaram requisitos para o mercado, alavancando o desenvolvimento nessas áreas (YANG; LU; LI, 2013).

Outro fator que contribui com a evolução do mercado automotivo são as preocupações crescentes em relação à mobilidade urbana em grandes cidades, onde o tempo gasto no trânsito é significativo. Para se ter uma noção, segundo pesquisa realizada pelo Ibope em 2018, o paulistano médio gasta quase 3 horas por dia no trânsito (G1, 2018).

Os veículos urbanos leves híbridos têm ganhado destaque nos últimos anos devido a algumas vantagens em relação a essas tendências. Tais veículos oferecem maior eficiência energética em comparação aos veículos convencionais, reduzindo assim as emissões de gases de efeito estufa e a dependência de combustíveis fósseis (POWERS; NICASTRI, 2000). Além disso, proporcionam uma experiência de condução mais silenciosa e suave, contribuindo para a melhoria da qualidade do ar e redução do ruído nas áreas urbanas.

A definição formal do que é um veículo urbano leve não existe na documentação da SENATRAN. No entanto, ao se referir a tal classificação durante este trabalho, tem-se em mente um veículo de dimensões reduzidas, peso abaixo de 800 kg, projetado especificamente para uso urbano, ou seja, buscando atingir alta economia de combustível e baixas velocidades máximas.

Alguns tipos de veículos com esta proposta que foram comercializados no Brasil no passado são o Renault Twingo (1994 a 2002) e o Smart ForTwo (2009 a 2015). Nenhum deles, entretanto, possuía configuração híbrida e não têm sucessores diretos no mesmo nicho de mercado.

Quanto à denominação de veículo híbrido, tem-se em mente algo próximo da classificação de “Híbrido Suave” de acordo com Liu (2017), como mostra a tabela abaixo:

Tabela 1 – The main features and capabilities of various hybrid electric vehicles

Type of vehicle	Features and capabilities				
	Start–stop	Regenerative braking	Boost	Electric-only mode	Electric range (miles)
Micro hybrid	Yes	Possible	No	No	No
Mild hybrid	Yes	Yes	Yes	No	No
Full hybrid	Yes	Yes	Yes	Possible	Possible (<2)
Plug-in hybrid	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes (20–60)
Pure electric	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes (80–150)

Fonte: (LIU, 2017).

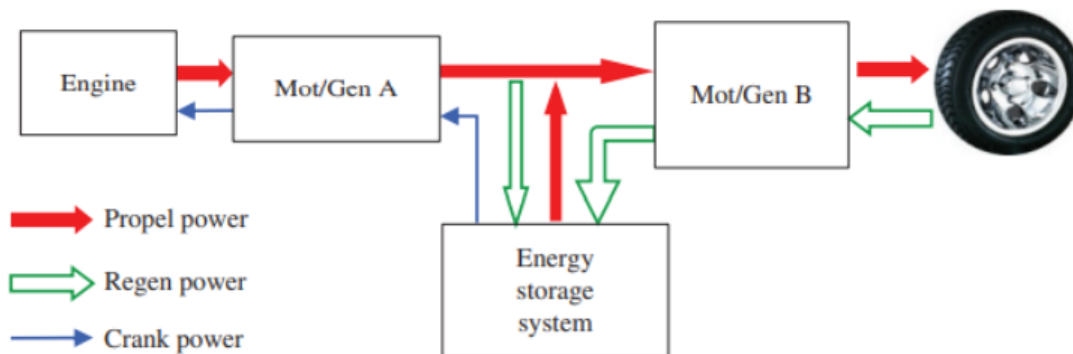
1.2 Objetivos

O presente trabalho busca implementar o subsistema de geração um veículo híbrido leve. Tal subsistema será responsável por gerar energia para todo o funcionamento do restante do veículo de forma inteligente. Ele possuirá 3 componentes principais: Um motor à combustão movido a etanol, um gerador trifásico que será acoplado mecanicamente ao eixo do motor e um retificador que será instalado na saída do gerador.

Será feito o controle de forma autônoma da rotação do motor onde, variando sua rotação, visa-se manter constante a tensão na saída do retificador. Tal saída irá alimentar um barramento onde os demais subsistemas estarão conectados.

Essa configuração de sistema onde apenas os motores elétricos fornecem mobilidade ao veículo enquanto que o motor à combustão funciona meramente como um gerador de energia estacionário não é algo novo, sendo classificado como arquitetura em série (CHAN, 2002).

Figura 1 – Power flow of a series hybrid electric vehicle.



Fonte: (LIU, 2017).

Além disso, será feito o projeto de hardware para um retificador trifásico com circuito boost interleaved com capacidade de até 15.000 watts, responsável por converter

as ondas geradas pelo gerador em um nível DC de 96 volts. Todos os outros subsistemas do veículo estarão preparadas para trabalhar com este nível de tensão. Neste momento do projeto, busca-se mesclar componentes projetados pela equipe com componentes de mercado, como por exemplo a ponte retificadora e os drivers para acionamento dos transistores, bem como circuito.

1.3 Justificativa

No contexto brasileiro, a necessidade de uma variante flex para veículos urbanos leves híbridos é particularmente relevante. O Brasil é um país com uma matriz energética diversificada e um dos maiores produtores de biocombustíveis do mundo, destacando-se pela produção de etanol a partir da cana-de-açúcar. Além disso, tal combustível já possui um histórico de uso muito grande no país, impulsionado por programas governamentais como o Proálcool, o Inovar Auto e, atualmente, o Rota 2030.

A produção de 610,1 milhões de toneladas de cana de açúcar está prevista para 2023, um aumento de 5,4% em relação à temporada passada (CONAB, 2023). A produção de biocombustível teve aumento de 2,1% em relação à safra passada, impulsionados pelo incremento na produção do etanol à base de milho (CONAB, 2023), estimada em 6 bilhões de litros, e também do produto à base de cana-de-açúcar na região Nordeste.

A produção total do país foi estimada em 30,5 bilhões de litros, sendo 12,97 bilhões de litros de etanol anidro e 17,53 bilhões de litros de etanol hidratado (CONAB, 2023).

Quanto ao mercado automobilístico, vendas de carros híbridos cresceram 41% em 2022 (ABVE, 2023) e a previsão é que carros híbridos no mercado brasileiro aumentarão sua participação 3,6 vezes até 2032 (EPE, 2023).

Ademais, o Brasil é o maior país do mundo sem uma marca nacional de carros expressiva. Logo, existe uma lacuna muito grande neste setor no mercado interno, existindo até incentivos governamentais para fomentar a instalação de novas fábricas de veículos nacionais e a fabricação de carros “populares” com a redução de alíquotas de impostos, além do já citado programa Rota 2030.

1.4 Organização do Trabalho

A organização do trabalho se dá inicialmente por duas colunas de atividades concorrentes, que serão executadas paralelamente, e que podem ser vistas na figura 2; Essas colunas então se somam, e dão continuidade ao trabalho em suas últimas atividades até a sua conclusão. Todo esse processo pode ser visto na figura 2, assim como o seu planejamento de horas para a realização de cada tarefa está na tabela 2.

Além disso, na figura 3 segue a demonstração do empenho paralelo de horas para a coluna de atividades 1 e a coluna de atividades 2, seguido da sequência final de atividades, e na figura 4 segue nosso planejamento de escrita dessa monografia, paralela aos tópicos já citados.

Figura 2 – Árvore de atividades.

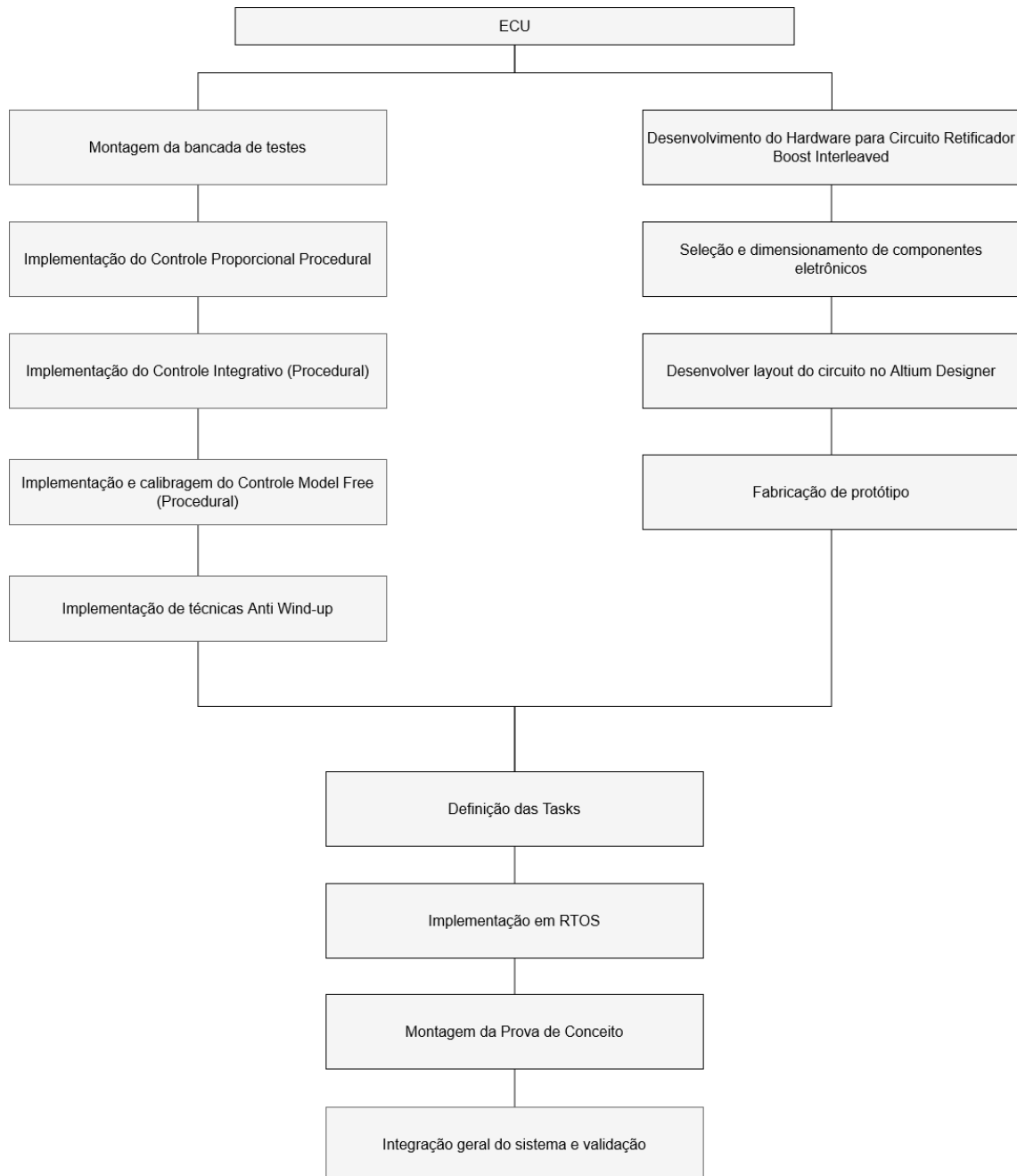


Tabela 2 – Carga horária em cada atividade.

Atividade	Descrição	Carga Horária
1.1	Montagem da bancada de testes	12h
1.2	Implementação do controle proporcional procedural	12h
1.3	Implementação do controle integrativo (procedural)	12h
1.4	implementação e calibragem do controle Model Free (procedural)	14h
1.5	Implementação de técnicas Anti Wind-up	12h
2.1	Desenvolvimento do Hardware retificador trifásico boost interleaved	16h
2.2	Seleção e dimensionamento de componentes eletrônicos	12h
2.3	Desenvolver layout do circuito no Altium Designer	10h
2.4	Fabricação de protótipo	14h
3	Definição das Tasks	14h
4	Implementação em RTOS	14h
5	Montagem da prova de conceito	14h
6	Integração geral do sistema e validação	14h
7	Escrita da monografia	68h
Total		238h

Figura 3 – Sequência de atividades.

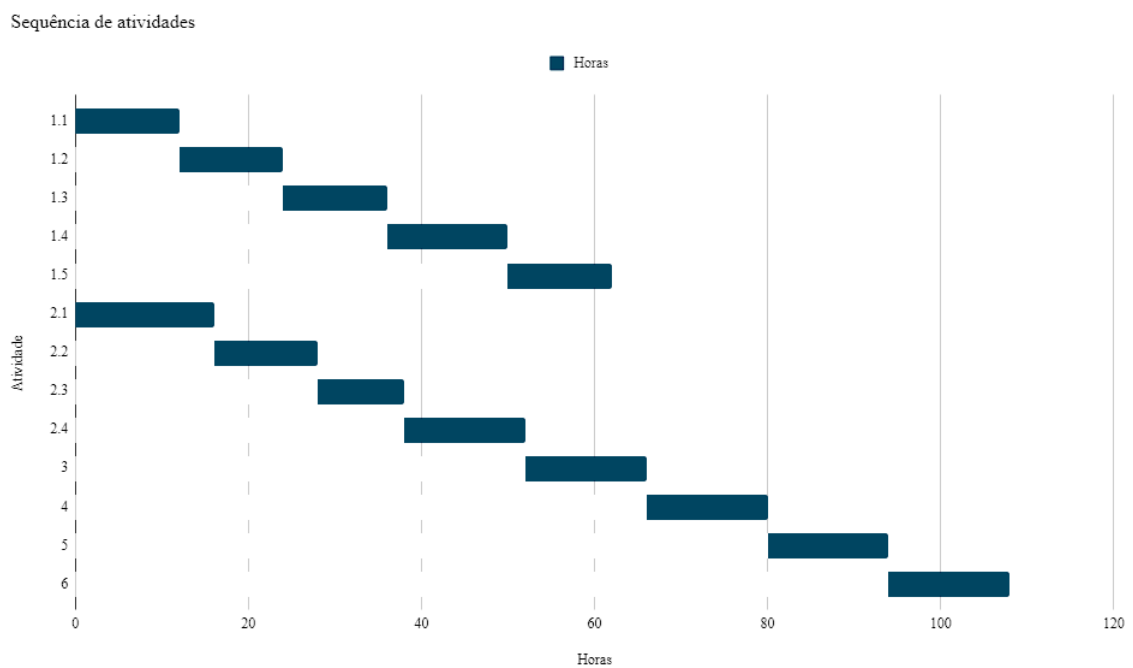
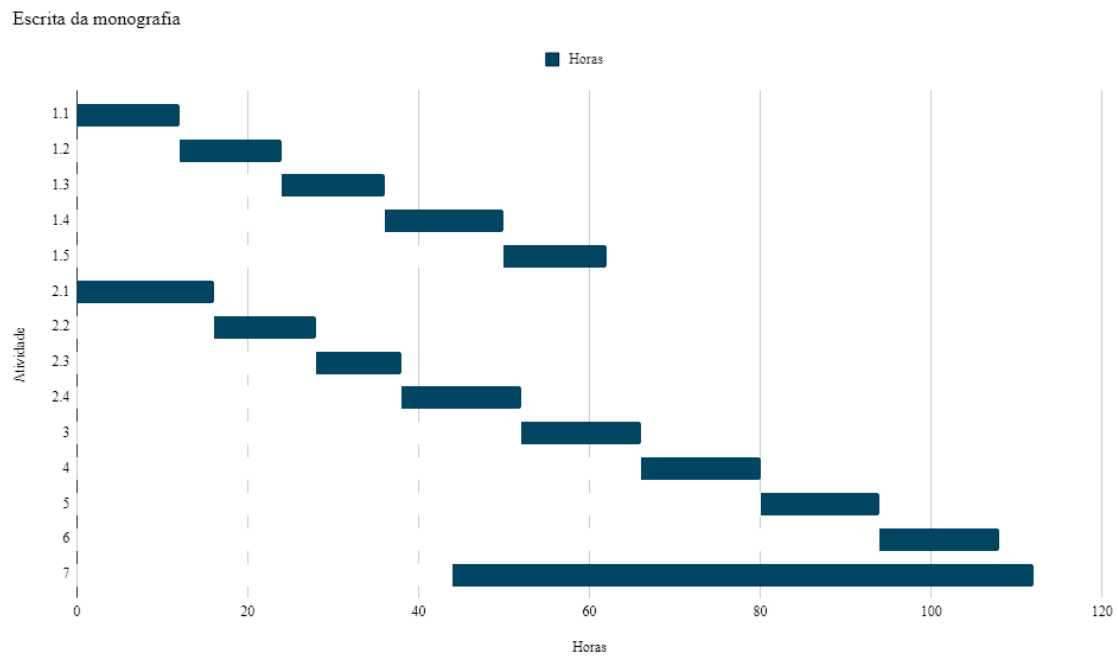


Figura 4 – Escala de atividades com escrita da monografia.



2 Aspectos Conceituais

2.1 Sensores e Atuadores do motor à combustão.

Primeiramente, é necessário listar os componentes eletrônicos do motor a combustão pertinentes a este projeto. Trata-se de um Honda 250cc retirado de uma moto modelo CB Twister 2016. Este motor em específico conta com os seguintes sensores:

- MAP: Vai instalado no corpo da válvula borboleta e mede a pressão do ar de admissão (neste caso específico, também possui a função de determinar a fase do motor através da medição de pressão negativa na admissão). Apresenta curva característica linear.
- IAT: Vai instalado no corpo da válvula borboleta e mede a temperatura do ar de admissão, não apresenta curva característica linear, não é crítico para o funcionamento do motor.
- OCT/ECT: Mede a temperatura do óleo do motor, não apresenta curva característica linear. Possui função de segurança apenas, não impactando no funcionamento do motor.
- TPS: Sensor de posição da válvula borboleta. Mede o ângulo de abertura da válvula borboleta. Apresenta curva característica linear (trata-se de um potenciômetro).
- Sonda Lambda: Vai instalada no escapamento. Mede a relação estequiométrica entre ar e combustível nos gases de escape. No caso deste motor, a sonda lambda é de banda estreita, ou seja, ela atua como um comparador, apenas informando se a mistura de ar/combustível está rica ou pobre onde o set point é igual a 0.45v, sem informar a relação estequiométrica exata de forma analógica.
- CKP: Vai instalado próximo à roda fônica do motor. Sensor de efeito hall que mede sobressaltos da roda fônica para determinar a posição do virabrequim do motor.

Já os atuadores do motor controlados eletronicamente são os seguintes:

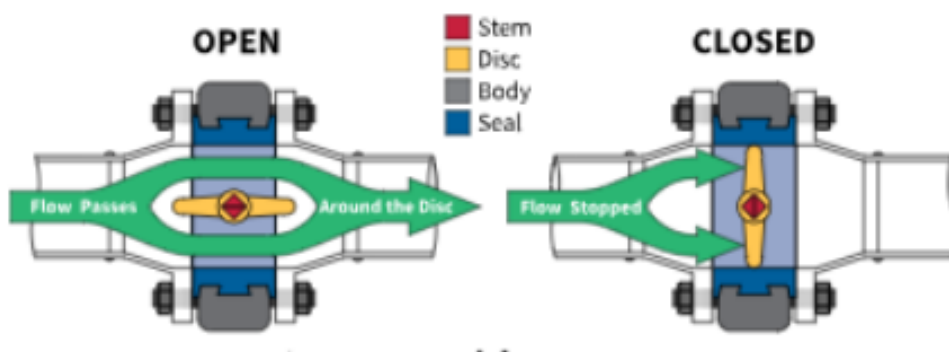
- Vela de Ignição: Gera a faísca que iniciará a combustão da mistura ar/combustível dentro do motor. Composto por uma bobina que carrega por um tempo e dispara toda essa carga em dois terminais próximos, criando um arco de faísca entre eles.
- Bico injetor: Borrifa combustível no corpo da válvula borboleta, criando a mistura ar/combustível que será sugada pelo motor. Basicamente é uma válvula controlada

por solenoide que fica aberta durante um período na casa de milissegundos. A vazão de combustível quando ela está aberta é aproximadamente constante.

- Atuador de marcha lenta: Válvula controlada por solenoide que admite uma pequena quantidade de ar quando motor não está sendo acelerado (válvula borboleta 100% fechada) apenas para o motor não cessar funcionamento. Espécie de bypass da válvula borboleta.

Entretanto, o atuador mais importante de todo o sistema é operado mecanicamente. Trata-se da Válvula Borboleta. Tal componente regula o volume de mistura ar/combustível que é admitido para dentro da câmara de combustão variando seu ângulo de abertura entre 0 graus (totalmente fechada) e 90 graus (totalmente aberta).

Figura 5 – Fluxo de ar pela válvula borboleta.



2.2 Automação da válvula borboleta.

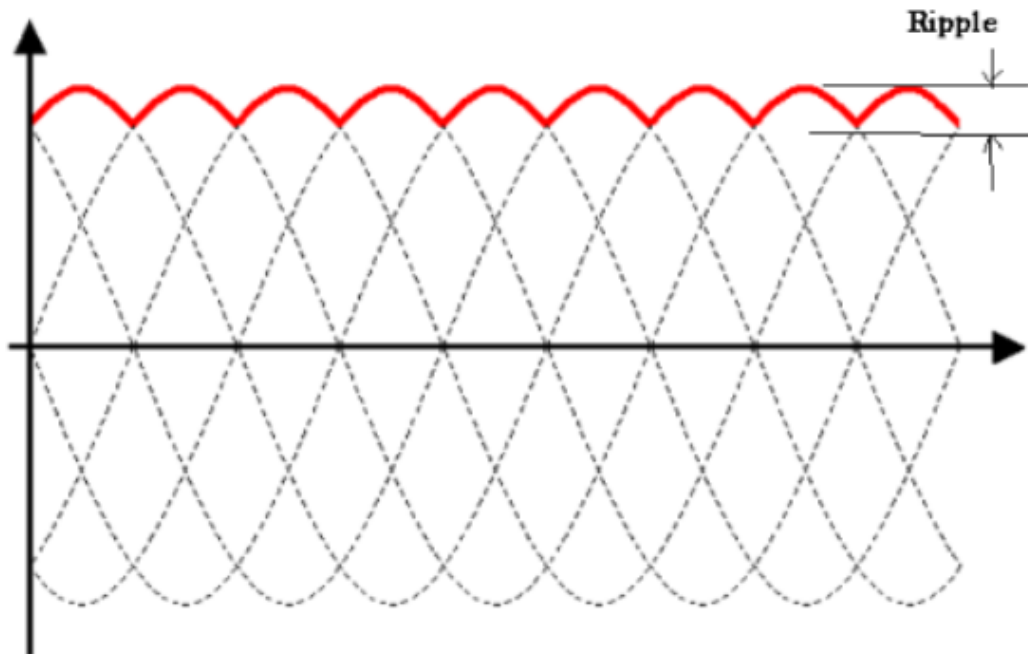
A diferença fundamental entre o motor e o software de controle original embutido em sua ECU (Engine Control Unit) está na forma como é feito o controle do ângulo da válvula borboleta. Será utilizada uma ECU customizada para controlar o funcionamento do motor.

Na aplicação original do motor, o ângulo responde ao acionamento do acelerador da moto, operado mecanicamente através de um cabo pelo motorista. Durante o desenvolvimento deste trabalho, o sistema será automatizado de forma que o ângulo da válvula borboleta passará a ser manipulado de forma autônoma por meio de um motor acionador.

Além disso, a nova ECU irá utilizar a leitura do sensor CKP para determinar o número de rotações por minuto do motor. Este dado está diretamente ligado à tensão na saída do retificador trifásico e será feita uma tabela correlacionando essas duas grandezas

para realimentar a malha de controle do sistema. Esta tensão será aproximadamente constante e possuirá o formato de uma onda trifásica retificada, como é mostrado abaixo:

Figura 6 – Forma de onda trifásica retificada.



Conforme a demanda de corrente pelo veículo aumenta, por exemplo em um caso de forte aceleração dos propulsores elétricos, a resistência à rotação do gerador irá aumentar. Isso ocorre por dois motivos: Primeiramente, o aumento na demanda por corrente resultará em uma maior carga elétrica sobre o gerador. Isso pode levar a um aumento na resistência ao giro, pois o gerador precisa fornecer mais energia para atender à demanda crescente. Além disso, o torque eletromagnético gerado pelo gerador aumentará com a carga. Isso ocorre porque a força eletromagnética necessária para gerar a corrente elétrica também aumenta. Um maior torque eletromagnético resultará em uma resistência mecânica maior.

Neste momento, é esperado que a rotação do motor à combustão diminua. Por isso dar-se-a a necessidade da válvula borboleta atuar de forma autônoma e rápida para compensar esse novo cenário, sempre visando manter constante sua rotação.

A válvula borboleta é o único atuador que precisa ser manipulado para isso, visto que, como ele possui o TPS, todos os outros componentes do sistema de injeção irão responder ao seu movimento.

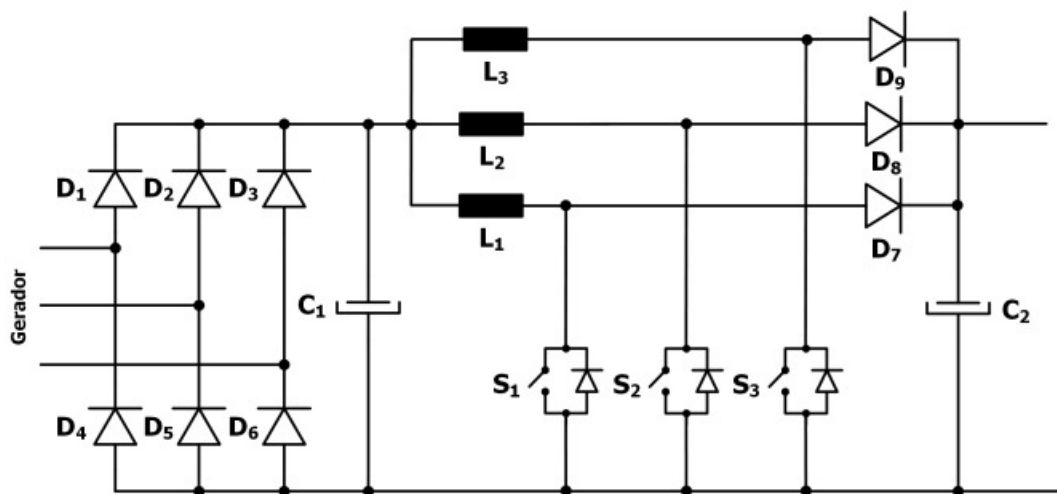
2.3 Retificador Trifásico com circuito Boost Interleaved.

Como demonstrado na Figura 6, a forma de onda despejada pelo gerador precisa ser transformada num nível DC para ser possível alimentar os demais subsistemas do veículo através de um barramento. Em decisão de projeto, foram estabelecidos 96V como o valor da tensão neste barramento. Porém, o gerador projetado não consegue atingir esta tensão, mesmo girando na rotação máxima do motor à combustão. Portanto, faz-se necessário um circuito elevador de tensão.

O retificador em si consiste apenas em seis diodos organizados em ponte.

Para o restante do circuito, foi escolhido o uso de um conversor CC-CC elevador de tensão interlaçado (boost interleaved). Este tipo de topologia, segundo (CORUH et al., 2011) proporciona uma eficiência maior ao conversor através do cancelamento de componentes harmônicas na saída. Também reduz o ripple de corrente e volume do circuito de potência, pois divide a corrente total do sistema em três ramos e melhora problemas de compatibilidade eletromagnética, embora exija um aumento no número de semicondutores e indutores.

Figura 7 – Topologia do retificador com circuito boost interleaved.

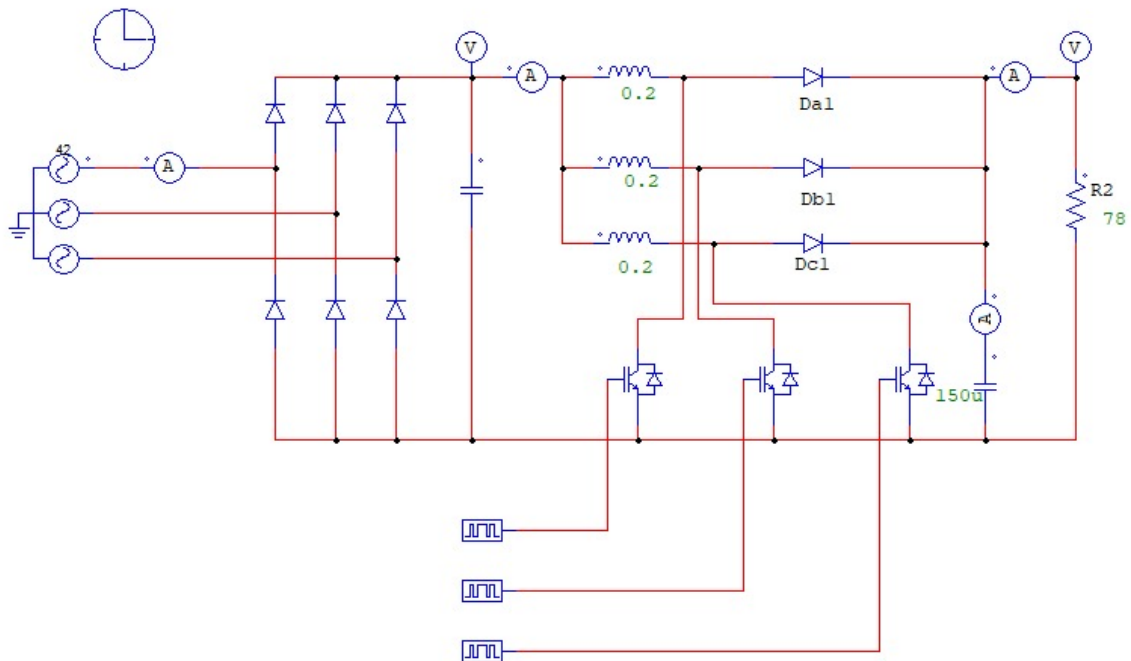


O circuito boost interleaved funciona chaveando os transístores (S_1 , S_2 e S_3) um de cada vez e defasados de 120 graus. Quando a chave está aberta, a corrente passando pelo ramo é direcionada para o capacitor C_2 , que estará conectado diretamente ao barramento, carregando-o em certa medida. Os transístores operam de forma complementar com razão cíclica fixa em 50 utilizando modulação em frequência para controlar a transferência de potência a C_2 . Dessa forma, é possível controlar o nível de tensão no barramento do veículo.

Com a finalidade de validação e prova de conceito, ele foi reproduzido no software

de simulação Powersim. Foram injetados sinais PWM com Duty Cycle de 50, frequência de 10KHz nas chaves. Cada um dos três sinais estava defasado de 120 graus um em relação ao outro. Além disso, na entrada do retificador foi inserida uma onda trifásica com tensões de pico compatíveis com as tensões alcançadas pelo gerador durante seus ensaios de caracterização.

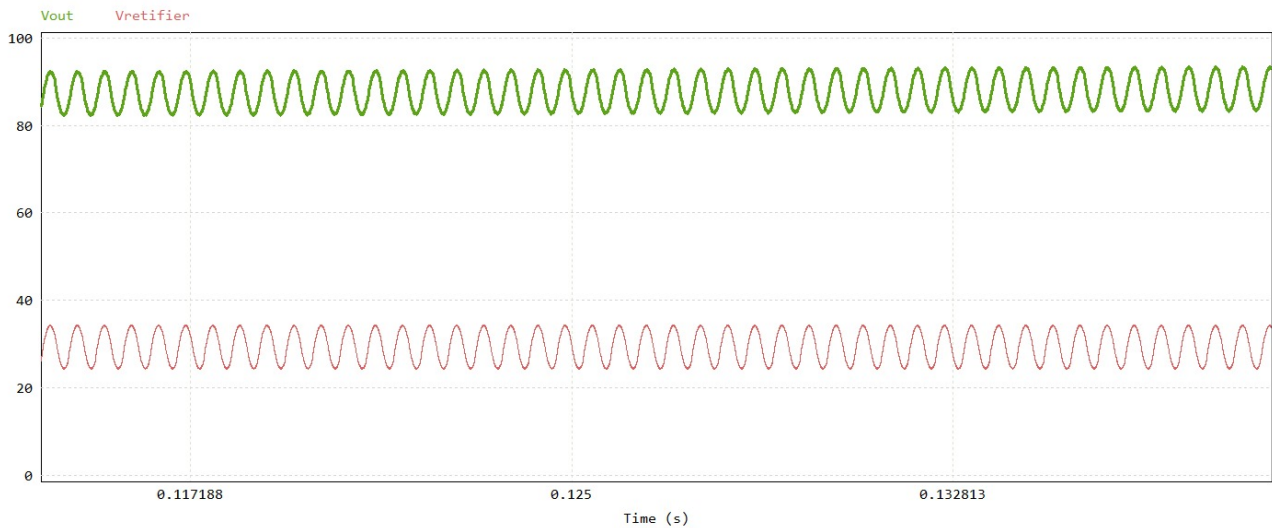
Figura 8 – Circuito do Retificador no PSIM



Nessas condições, foi possível constatar a correta função de elevador de tensão do circuito boost. Ele foi capaz de fornecer tensões iguais ou superiores a 96V, que é a tensão prevista no projeto. Na figura abaixo, foi escolhida uma das fases da onda trifásica que entra para o retificador ($V_{retifier}$) e a tensão encima do capacitor C_2 de saída (V_{out}). A comparação das duas ondas durante a simulação é apresentada abaixo:

Por conta da limitação de tempo e alta complexidade das atividades correlacionadas, o controle do circuito boost interleaved fugiu do escopo deste projeto.

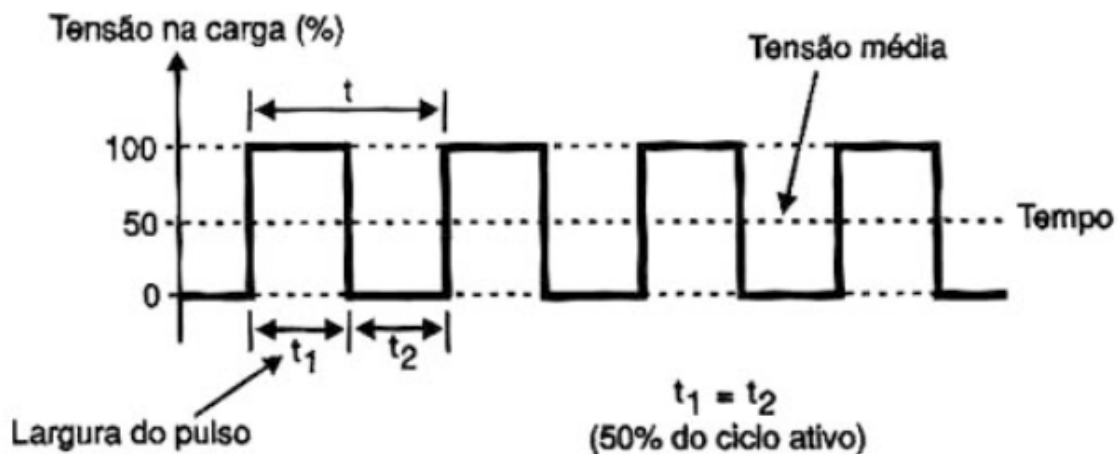
Figura 9 – Simulação do Retificador no PSIM



2.4 Sistema de controle da Válvula Borboleta e Controle Model-Free.

Para realizar o controle do motor CC que atuará na válvula borboleta, a variável de saída do microcontrolador é um sinal do tipo PWM que varia seu duty cycle entre 0% e 100%:

Figura 10 – Análise do duty cycle.



Já a variável de entrada do sistema, que realimenta o microcontrolador, será a leitura do nível de tensão média na saída do retificador trifásico (ver Figura 10).

Será aplicado o controle Model-Free (FLIESS; JOIN, 2013). Sua vantagem é que ele dispensa qualquer tipo de modelagem e extração de plantas ou funções de transferências do sistema. Tudo isso é abstraído por meio de um estimador linear, que tenta compensar

quaisquer não linearidades do sistema de forma dinâmica. Tal tipo de controle é ideal para o uso em microcontroladores devido ao pouco tempo necessário para recalculá-las suas estimações a cada nova iteração. Como o nosso sistema possui apenas uma variável de controle, podemos fazer a seguinte representação:

$$y^\nu = F + \alpha u \quad (2.4.1)$$

Onde u é a variável a ser controlada e y é a variável de saída. " α " é uma constante calibrada empiricamente de forma a manter αu na mesma magnitude de y^ν , onde ν é a ordem da derivada de y e na maioria dos casos de aplicação, seu valor é escolhido em 1 ou 2. O que torna o controle Model-Free interessante é a estimação de F . Ele é uma parcela atualizada a cada iteração do microcontrolador e serve para contrabalançar e prever quaisquer fatores e distúrbios desconhecidos da planta em questão, tornando o sistema bem mais robusto no geral. Ao fechar a malha de controle do sistema via um controlador do tipo iPID e considerando apenas como exemplo que $\nu = 2$, temos a seguinte função:

$$u = -\frac{F - \ddot{y}^* + K_P e + K_I \int e + K_D \dot{e}}{\alpha} \quad (2.4.2)$$

Substituindo u dado em (2.4.2) na função (2.4.1), ficamos com o seguinte formato:

$$\ddot{e} = K_D \dot{e} + K_P e + K_I \int e = 0 \quad (2.4.3)$$

Ou seja, a parcela F foi anulada. Dessa forma, basta calcular as constantes K_D , K_P e K_I de forma convencional como seria em um controlador PID comum. Porém esta tarefa costuma apresentar diversas vantagens (FLIESS; JOIN, 2013).

O modo prático pelo qual "anulamos" F é por meio do Estimador Algébrico, onde integramos amostras anteriores de ambas entrada e saída da planta. A discretização do Estimador Algébrico é descrita por (NEVES; ANGÉLICO, 2022) como:

$$\hat{\phi} = \frac{60}{T^5} \sum_{k=0}^N a_k \{T^2 - 6TkT_s + 6(kT_s)^2\} y[k] + \frac{30\hat{a}}{T^5} \sum_{k=0}^N a_k \{(T - kT_s)^2 (kT_s)^2\} u[k] \quad (2.4.4)$$

Onde T_s é o período por amostra, T é o tempo de amostragem total, \hat{a} é o parâmetro arbitrário discutido anteriormente e finalmente:

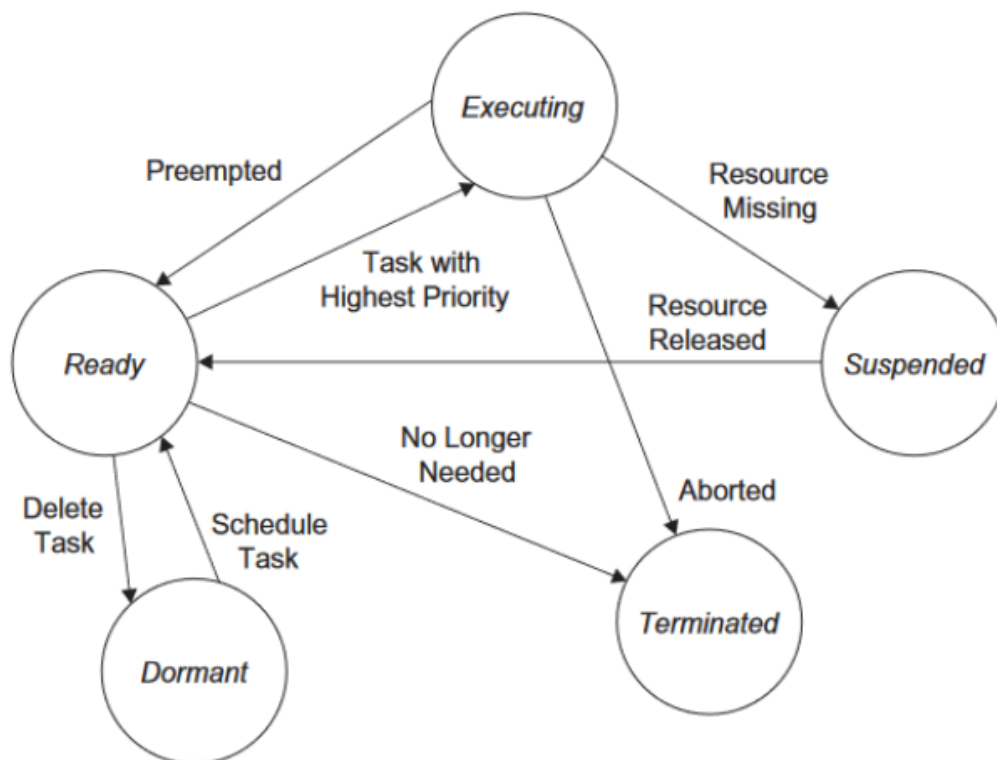
$$a_k = \begin{cases} T_s/2, & k = 0 \text{ e } k = NT_s \\ T_s, & k = 1 \dots n - 1 \end{cases} \quad (2.4.5)$$

2.5 Sistema Operacional em Tempo Real.

O funcionamento de múltiplos sistemas críticos presentes nos acionamentos dos atuadores para a operação do motor e os sistemas de monitoramento relacionados a tanto a ele e as baterias criam desafios relacionados à pontualidade e tempo de resposta das sub rotinas relacionadas a tais tarefas. Tal aplicação é muito complexa para sistemas com alto desperdício de tempo como polled loops e rigorosa para sistemas simples utilizando interrupções sem a garantia da execução pontual ou harmonia entre as tarefas (LAPLANTE; OVASKA, 2011).

Os Sistemas Operacionais em Tempo Real solucionam tais problemas escalonando tarefas com base na sua prioridade e seu estado de execução previamente a sua execução ao invés de gerenciar o timeshare através de interrupções. A política utilizada pelo Escalonador para definir a ordem de execução será explicitada à frente.

Figura 11 – Diagrama de Estados parcial de uma tarefa.



Fonte: (LAPLANTE; OVASKA, 2011).

Uma tarefa t_i é caracterizada por tais parâmetros (BUTTAZZO, 2011):

- Restrições de Precedência: especifica se alguma tarefa precede outra.
- Tempo de liberação $r_{i,j}$: o tempo onde é possível iniciar a instância j de uma tarefa t_i .

- Fase ϕ_i : tempo de liberação da primeira instância da tarefa t_i .
- Tempo de Resposta: tempo entre a ativação e a conclusão da tarefa t_i .
- Deadline absoluta d_i : instante limite que a tarefa t_i deve ser concluída.
- Deadline relativa D_i : tempo de resposta máximo para concluir a tarefa t_i .
- Tipo de Relaxamento: simboliza a urgência da tarefa t_i .
- Período p_i : intervalo de tempo entre liberações consecutivas de uma mesma tarefa t_i .
- Tempo de execução e_i : tempo de execução da tarefa t_i .

O escalonamento de Taxa Monotônica (Rate Monotonic Scheduler) é o algoritmo ótimo de prioridade fixa que garante a solução de escalonamento de um conjunto de tarefas, caso ela exista (BUTTAZZO, 2011).

O algoritmo denomina a prioridade de tarefas de forma inversamente proporcional a seu período, ou seja, quanto maior a frequência de uma tarefa, maior sua prioridade.

A utilização da tarefa é dada por:

$$u_i = \frac{e_i}{p_i} \quad (2.5.1)$$

Definimos também a utilização total do processador como:

$$U = \sum_{i=1}^n u_i \quad (2.5.2)$$

Onde utilizações acima de $U = 1$ correspondem a um conjunto de tarefas não escalonáveis (LAPLANTE; OVASKA, 2011).

2.6 Determinação dos Pontos de Operações Ótimos do Motor a Combustão Interna.

Encontrar os pontos ótimos de operação consiste na minimização das funções:

$$J_1 = a_1 comb + a_2 X_1 + a_3 X_2 + \dots + a_m X_{m-1} \quad (2.6.1)$$

$$J_2 = b_1 J_{P1} + b_2 J_{P2} + \dots + b_n J_{Pn} \quad (2.6.2)$$

Onde *comb* é o consumo de combustível e *X* corresponde a gases originados da combustão interna do álcool. Em relação a segunda função, J_{P1} é o valor da função J_1

onde o MCI está inativo (a saída de energia é nula) e J_{P_n} corresponde ao valor da função J_1 onde o MCI operando no n ésimo nível de potência (LIU, 2017).

Os pontos de rotação ótimos referentes a função J_1 podem ser encontrados através da busca por razão áurea:

- 1. Estabelecer dois extremos de valores de rotação a e b .
- 2. Testar dois pontos de rotação $f(c)$ e $f(d)$, onde $c = a + (a - b) * 0.618$ e $d = b - (a - b) * 0.618$.
- 3. O ponto correspondente a menor função substitui o ponto anterior mais próximo, ou seja, $a = c$ ou $b = d$.
- 4. Repita até a convergência desejada.

Portanto, o algoritmo final para encontrar o ponto ótimo segue:

- 1. Determinar quantos níveis de potência o MCI opera.
- 2. Calcular os valores da função J_1 para um nível de potência em diferentes rotações.
- 3. Encontrar a rotação ótima que minimiza a função J_1 para diferentes níveis de potência.
- 4. Obter os pontos operacionais que minimizam J_2 onde $\sum_{i=1}^n b_i J_{P_n} = \min$

3 Método do trabalho

Tendo em base o cronograma e a sequência de atividades estabelecidas no item 1.4, seguem as metodologias aplicadas a cada atividade do trabalho:

- 1.1 - Montagem da bancada de testes: O corpo de borboleta, com seus sensores e atuadores acoplados, será montado em uma bancada, de modo que todas as suas funções possam ser avaliadas.
- 1.2 - Implementação do controle proporcional procedural: Juntamente com a elaboração do controle Model-Free (estimador), foi integrado o controle proporcional.
- 1.3 - Implementação do controle integrativo (procedural): Juntamente com a elaboração do controle Model-Free (estimador), foi integrado o controle integrativo.
- 1.4 - Implementação e calibragem do Controle Model Free: O método de controle do ângulo da válvula borboleta escolhido foi o Model-Free. A calibração dele será feita com a válvula isolada em bancada de testes.
- 1.5 - Implementação de técnicas Anti Wind-up: Para proporcionar melhor estabilidade no controle, foram implementadas técnicas anti Wind-up.
- 2.1 - Desenvolvimento do Hardware do retificador e circuito boost interleaved: Precisaremos desenvolver hardware capaz de lidar com a potências de até 15K watts. O desenvolvimento dessa solução será dado com a análise do sistema de partida do motor a combustão, para que seja encontrada a melhor solução para a aplicação.
- 2.2 - Seleção e dimensionamento de componentes eletrônicos: A partir do hardware estipulado no item anterior, será feita a análise das necessidades do conjunto, para dimensionarmos e estipularmos os componentes necessários para a implementação de tal hardware.
- 2.3 - Desenvolver layout do circuito no Altium Designer: Será prototipada uma placa de circuito impresso com base no esquemático desenvolvido para a função do item 2.1
- 2.4 - Fabricação de protótipo: Com o layout prontos, e os componentes estipulados, seguiremos para a fabricação do protótipo de acionamento do motor a combustão, para que este seja acoplado ao sistema como um todo.
- 3 - Definição das Tasks: Nessa etapa, as necessidades do funcionamento e do acionamento de cada parte do conjunto será analisada, para que os parâmetros sejam estabelecidos, e assim possamos cumprir os requisitos.

- 4 - Implementação em RTOS: Definidos os parâmetros do item anterior, será adequado e implementado o Real Time Operating System, para que este gerencie o software de controle do conjunto.
- 5 - Montagem da prova de conceito: Cumpridas todas as etapas anteriores, poderemos finalmente montar o sistema completo em bancada, para então darmos início às análises finais.
- 6 - Integração geral do sistema e validação: Com o sistema completo montado em bancada, faremos a integração das partes, assim como as devidas conexões mecânicas e eletrônicas, e também a aplicação do software. Ligado o sistema, faremos a análise do controle do hardware pelo software, de modo a validar a autogestão do conjunto.

4 Especificação de Requisitos

Neste trabalho, está presente o desenvolvimento de um sistema complexo, englobando todo o subsistema de geração para um veículo urbano leve híbrido flex, que funcionará a partir de uma constante análise da situação do powertrain, do nível de bateria e de outras informações do barramento, feita pela ECU. Este desenvolvimento contará com soluções desenvolvidas especificamente para esse projeto, além do uso de sistemas já existentes, aplicando modificações e melhorias nestes, para que se adéquem às necessidades do projeto. Dentre os requisitos necessários ao desenvolvimento do projeto, destacam-se:

- 1. Elaboração do controle da válvula borboleta: Será feito o desenvolvimento do controle, via acionador acoplado, da válvula borboleta, sob controle de software.
- 2. Hardware retificador e boost interleaved: Será projetado e construído hardware capaz de lidar com potências de até 15K watts.
- 3. Utilização de uma variável única para amostragem do sistema, sendo ela a rotação do motor, aferida pelo sensor CKP. A rotação está diretamente ligada com a tensão gerada pelo gerador trifásico. Conforme a demanda de corrente do sistema, o torque necessário para rotacionar o eixo do gerador é alterado, ou seja, caso a demanda por energia aumente, o motor a combustão terá de fornecer maior torque ao eixo de rotação, para manter a rotação constante. A utilização de apenas uma variável para amostragem garante maior robustez ao sistema.
- 4. Sistema operacional em tempo real: Este item tem como requisito o gerenciamento de demandas do subsistema, podendo elencar prioridades e comandar ações em paralelo, designar tempos de espera, entre outras funções.

O cálculo do projeto tem como requisito atender às necessidades que um veículo urbano híbrido flex tem de seu subsistema de geração. Assim, mantendo o veículo, suas baterias e seus motores de tração alimentados.

Tendo elencado esses requisitos, temos como itens necessários à esse projeto:

- 1. Motor Honda flex 250cc, originário do modelo Twister, que será nosso motor a combustão
- 2. Um corpo de borboleta, para que seja acionado via software e componentes desenvolvidos no projeto.
- 3. Bancada de testes, para que sejam aferidos e coletados os dados resultantes.

- 4. Módulo ESP32, que será responsável por executar os softwares desenvolvidos para o controle do subsistema.
- 5. Componentes eletrônicos em geral, para fabricação do hardware responsável pelo acionamento e desligamento do motor a combustão; esses componentes serão especificados durante a execução dos itens da atividade 2 de nosso planejamento.
- 6. Ademais, para a análise dos sinais correntes no subsistema, será importante o acesso a itens como osciloscópio, multímetro, fonte de alimentação, fonte geradora de pulso, e outros utensílios comuns a um laboratório de eletrônica.

Em resumo, a especificação de requisitos apresentada neste capítulo delineou os elementos-chave para o desenvolvimento do sistema do veículo urbano leve híbrido flex. Ao abordar o controle da válvula borboleta, o hardware e o software de acionamento do motor a combustão e a implementação de um sistema operacional em tempo real, estabelecemos os fundamentos para a eficiência e o desempenho do subsistema de geração. Com designação dos componentes necessários, estamos preparados para avançar no projeto, buscando soluções e aprimoramentos que atendam às demandas do veículo urbano híbrido flex.

5 Desenvolvimento do Trabalho

5.1 Tecnologias Utilizadas

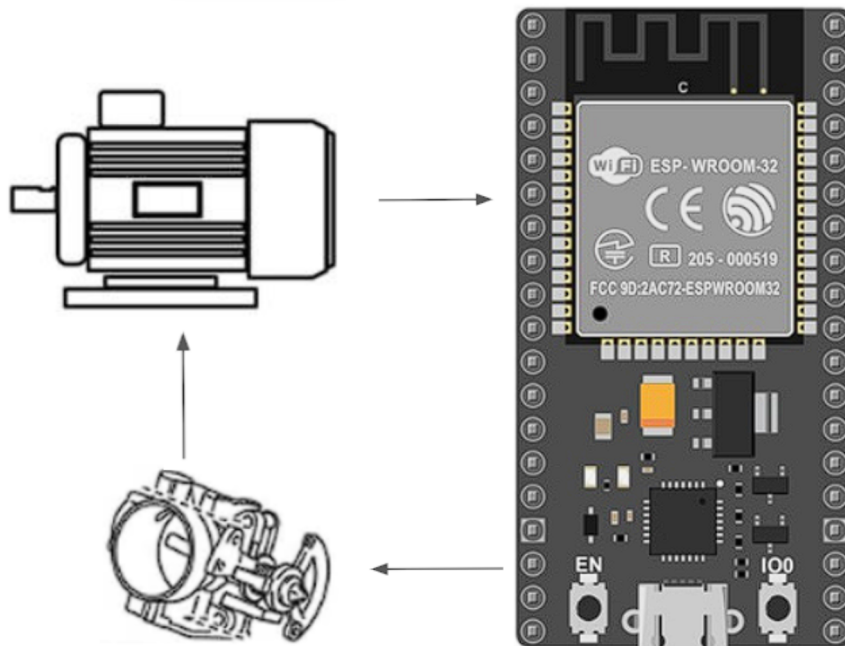
Como componente de processamento dos dados de entrada do sistema, utilizamos o ESP32, que conta com um processador dual core de 32 bits, 520 kB de memória RAM, 448 kB de memória ROM, tendo poder de processamento suficiente ao requisitado pelo controle Model Free que desenvolvemos. Além disso, o código do programa foi escrito via ESP-IDF (Espressif IoT Development Framework), que é um conjunto de ferramentas de desenvolvimento de software fornecido pela Espressif Systems.

Ademais, para nosso modelo análogo, utilizaremos um motor elétrico, que nos fornece uma saída digital do dado do tacômetro presente nela, via sensor CKP. Com esse dado, podemos implementar nosso sistema análogo, fazendo o controle da abertura da válvula borboleta, via controle Model Free implementado em nosso ESP32, com base no atual estado de rotação do motor. O correto controle acionador da válvula borboleta poderá ser avaliado em tempo real, ao se criar resistência no eixo de rotação do motor elétrico. Essa integração entre hardware e software é fundamental para o desempenho e a eficiência do sistema proposto como um todo.

5.2 Projeto e Implementação

O projeto representou um avanço significativo na área de controle de geração de energia em veículos híbridos, através da criação de uma solução Model Free para o controle de uma válvula borboleta. A implementação prática desse conceito envolve a combinação do ESP32 com o código desenvolvido, o motor elétrico equipado com tacômetro digital e a válvula borboleta que será acionada. Com a montagem deste sistema, conforme o esquema representado na figura abaixo, teremos nosso modelo análogo pronto para seguir em frente com os testes, visando a comprovação de sua eficácia na resolução do problema proposto.

Figura 12 – Esquema de montagem



5.2.1 Retificador Boost Interleaved

Todos os componentes do Retificador Boost Interleaved foram escolhidos com base em uma série de testes de performance feitos com o gerador trifásico, em trabalhos acadêmicos e em simulações computacionais de performance.

Primeiramente, no IEE-USP, foram feitos ensaios em vazio (tensão máxima), ensaios em curto circuito (corrente máxima) e ensaio de desempenho, utilizando uma carga aproximada que o sistema vai ter. Com base nos testes, em uma condição de uso normal do sistema, na rotação máxima do motor, seriam atingidas tensões e correntes por fase de aproximadamente, 66V e 72A, respectivamente.

Tabela 3 – Ensaio em vazio

gerador	V1 (V)	–	46,176	45,723	45,481	45,324
	V2 (V)	–	46,513	46,068	45,824	45,664
	V3 (V)	–	46,565	46,1	45,855	45,694
	f (Hz)	–	416,07	416,1	416,1	416,11
	t carcaça (oC)	30	37	42	47,3	50,5
					Rfinal (mW)	4,3117
					tquente (°C)≈	63,15

Tabela 4 – Ensaio em curto circuito

gerador	V1 (V)	44,4057	42,393	41,5268	39,7708	38,061
	V2 (V)	44,7112	42,8245	41,9937	40,2413	38,4945
	V3 (V)	44,7806	42,8985	42,0546	40,2579	38,5029
	I1 (A)	31,7558	64,535	73,57	83,41	94,184
	I2 (A)	31,8468	64,577	73,704	83,937	95,057
	I3 (A)	31,7774	63,799	72,668	82,647	93,659
	P (kW)	2,45293	4,7445	5,29637	5,73427	6,19188
	f (Hz)	414,91	413,76	415,39	414,67	415,35
				Rfinal (mW)	4,1648	
				tquente (°C)≈	53,01	

Tabela 5 – Ensaio de desempenho

gerador	V1 (V)	49,23	45,9771	44,3741	41,1185
	V2 (V)	49,7767	46,5884	44,9403	42,8073
	V3 (V)	49,8483	46,6301	44,9509	42,4402
	I1 (A)	69,382	89,499	97,437	111,624
	I2 (A)	69,467	88,456	98,158	110,504
	I3 (A)	68,595	89,834	98,158	106,034
	P (kW)	5,89127	7,08917	7,44441	7,8404
	f (Hz)	495,54	495,69	495,75	495,87
				Rfinal (mW)	4,1649
				tquente (°C)≈	53,01
				tcarça (°C)	53,01

Depois da caracterização do gerador, valores iniciais que mais adiante foram avaliados e validados com simulações foram calculados de acordo com (MAYER; PÉRES; OLIVEIRA, 2015).

Primeiramente, foram definidos alguns requisitos de performance do sistema que serviram de parâmetros para o dimensionamento. Eles são apresentados na tabela abaixo:

Tabela 6 – Ensaio de desempenho

Parâmetros Utilizados no Dimensionamento do Retificador

Potência de saída	$P = 15 \text{ kW}$
Número de braços	$N_f = 3$
Frequência de comutação	$f_{ch} = 20 \text{ kHz}$
Tensão do barramento	96 V
Ondulação de tensão da bateria	$\Delta V_o = 5\%$
Ondulação de corrente da bateria	$\Delta I L_o = 10\%$

O valor dos elementos passivos do conversor representados da Figura 7 são definidos por:

$$L_{1,2,3} = \frac{V_0(1 - \delta)}{N_f \Delta I L_o f_{ch}} \quad (5.2.1)$$

$$C_1 = \frac{V_0(1 - \delta_{buck})}{8L\Delta V_o(N_f f_{ch})^2} \quad (5.2.2)$$

$$C_2 = \frac{I_{CC}(1 - \delta_{boost})}{N_f \Delta V_{CC} f_{ch}} \quad (5.2.3)$$

$$\delta_{buck} = \frac{V_0}{V_{CC}} \quad (5.2.4)$$

$$\delta_{boost} = 1 - \frac{V_0}{V_{CC}} \quad (5.2.5)$$

$$\Delta I L_1 = N_f \Delta I L_o \quad (5.2.6)$$

$$f_{ondula} = N_f f_{ch} \quad (5.2.7)$$

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{eq}C}} \quad (5.2.8)$$

Onde V_0 é a tensão na entrada do retificador, V_{CC} é a tensão na saída do circuito boost, L_{eq} é a indutância equivalente da associação em paralelo entre L_1 , L_2 e L_3 quando há, simultaneamente, corrente circulando nas mesmas. Ao dimensionar os capacitores, é

necessário verificar a frequência de corte formada pelo filtro $L_{eq}C$, pois seu valor deve ser inferior à frequência de comutação adotada no projeto o $f_o < f_{ch}$. A relação de grandeza pode ser de 10 vezes para um projeto conservador, onde a frequência de corte do filtro deve ser, aproximadamente, dez vezes menor do que a frequência de comutação para evitar ressonâncias (MAYER; PÉRES; OLIVEIRA, 2015).

Já os componentes compostos por semicondutores do circuito foram dimensionados para suportar as correntes máximas obtidas nos ensaios do gerador com alguma margem de segurança.

Devido à praticidade e comodidade, foi escolhida uma ponte retificadora SEMIKRON modelo SKD 110/08 para integrar o projeto. Ela é projetada para suportar correntes de até 110A e 80V em cada diodo.

Os diodos escolhidos foram os STTH60RQ06WL, da ST Microelectronics e os transistores foram os STGW80H65DFB, da mesma marca.

O capacitor C_1 possui pouca influência na ondulação do sinal na saída do conversor CC-CC, portanto seu uso é opcional.

O inverso ocorre com o capacitor C_2 . Seu valor é elevado. Portanto, decidiu-se usar um banco de capacitores 680uF/200V da Nichicon. Isso ocorreu devido ao fato de um único capacitor com a capacitância total que o sistema requer capaz de suportar a tensão e corrente total ser demasiadamente grande e possuir elevado grau de perdas internas. Ao usar-se um banco de capacitores menores, a corrente total do sistema é dividida em cada um deles e facilitando a pré carga dos mesmos.

Para chavear os transistores, foram escolhidos drivers SEMIKRON modelo SKHI 10/12. Com ele, é possível fazer o chaveamento de frequências de até 20KHz e monitorar variáveis importantes do transistor, como o V_{ce} . Ele também possui diversas outras funcionalidades como detecção de erros e proteções, como por exemplo contra subtensão, sobretensão, picos de tensão e curto circuito.

Como os indutores calculados para o circuito não são encontrados comercialmente, eles irão ser projetados pela equipe envolvida no projeto. É previsto que eles possuirão dimensões e pesos consideravelmente grandes e por esse motivo, eles irão ser montados externamente à PCB. A conexão deles na PCB se dará por meio de parafusos M10 e o layout prevê essa montagem.

Por fim, foram adquiridos sensores de efeito hall TAMURA L01Z200S05, com capacidade de até 200A. Eles vão ser usados para monitorar as correntes em casa ramo do circuito, para alimentar a malha de controle do retificador.

Os esquemáticos e layout do circuito foram desenvolvidos usando o programa Altium Designer. Toda a PCB foi desenvolvida baseada nas fórmulas presentes na norma

IPC-2221. O correto dimensionamento da largura de trilha em um circuito impresso garante que uma determinada corrente possa ser conduzida sem causar superaquecimento ou danos à placa e minimizando suas resistências.

A mínima largura necessária do condutor, em milímetros, é calculada por, segundo as normas IPC-2221:

$$L = \frac{I}{K\Delta T^{0.44}} \frac{1}{1.378E} 0.025 \quad (5.2.9)$$

Onde I é a corrente máxima em amperes que o condutor deve suportar, ΔT o aumento de temperatura máximo tolerável, K uma constante que pode assumir o valor de 0.048 caso trilha esteja localizada em uma camada externa ou 0.024 caso esteja em uma camada interna da placa e E é a espessura da camada de cobre utilizada.

Além disso, também é possível calcular a resistividade de cada trilha criada, o que pode ser um parâmetro relevante em futuras revisões de layout e otimizações. O cálculo da resistência é realizado levando em consideração a variação da temperatura do cobre. O valor da resistividade é modificado de acordo com uma aproximação linear. Para tal, deve-se considerar que temperatura T não varia muito em torno uma temperatura base escolhida, geralmente 25 graus. O cálculo da resistividade é dado por:

$$R = \frac{\rho_0[1 + \alpha(T - T_0)]C}{A} \quad (5.2.10)$$

Considerando que o material do condutor seja cobre, ρ_0 vale $1.68 * 10^{-5} \frac{\Omega}{mm}$ e α vale $3.86 + 10^{-3} \text{ } ^\circ C^{-1}$. C é o comprimento da trilha em mm e A é a área da secção transversal do condutor.

Levando todos esses fatores expostos acima em consideração, o layout da PCB necessitou ser composto majoritariamente por polígonos devido ao fato deles aproveitarem uma maior área de cobre em relação às trilhas convencionais. Os polígonos também facilitam a dissipação de temperatura além de serem mais resistentes ao problema de descolamento de cobre do fenolite da placa.

Também utilizaram-se duas camadas de cobre. A camada em vermelho é a superior e a em azul é a inferior. O esquemático e layout desenvolvidos no Altium Designer são apresentados abaixo:

Figura 13 – Esquemático Altium

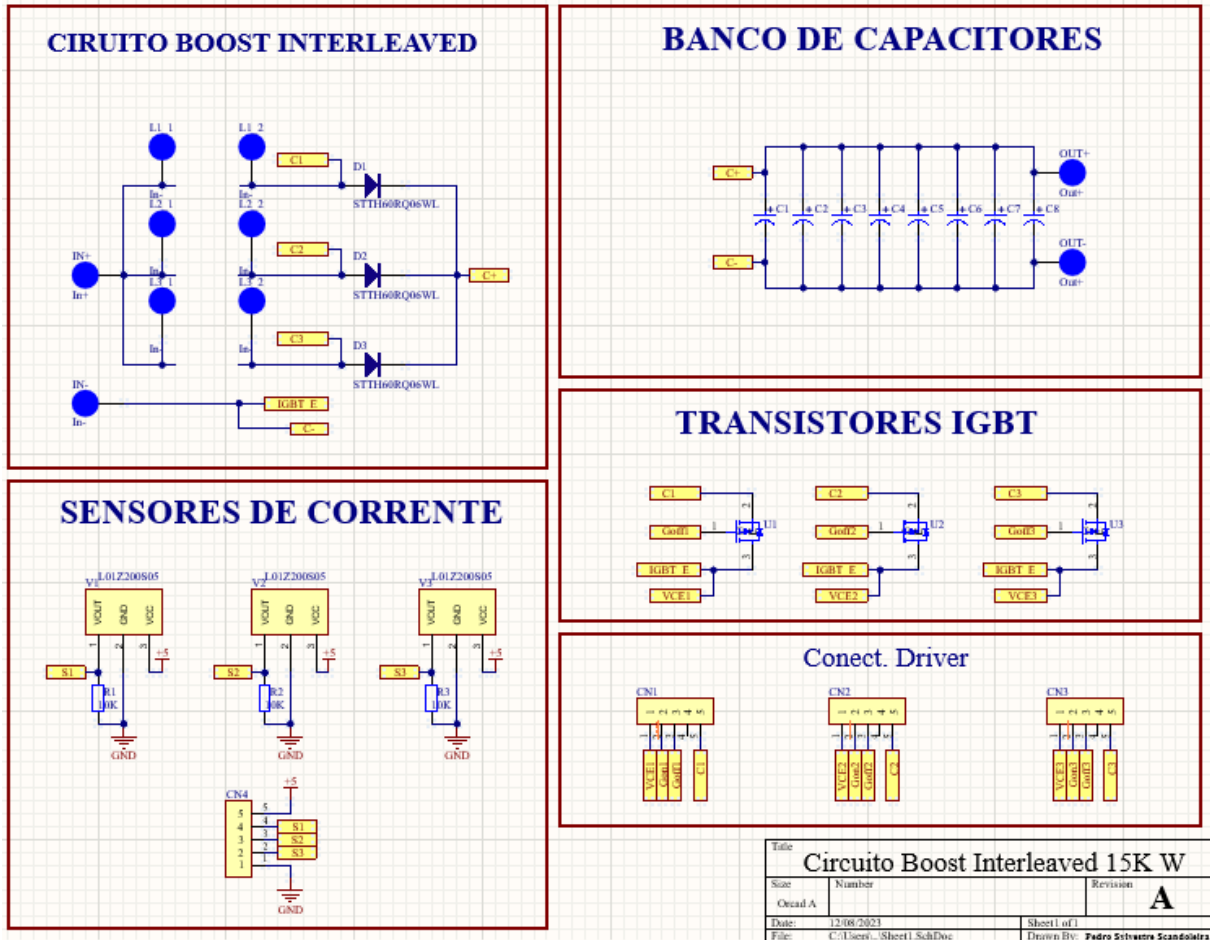
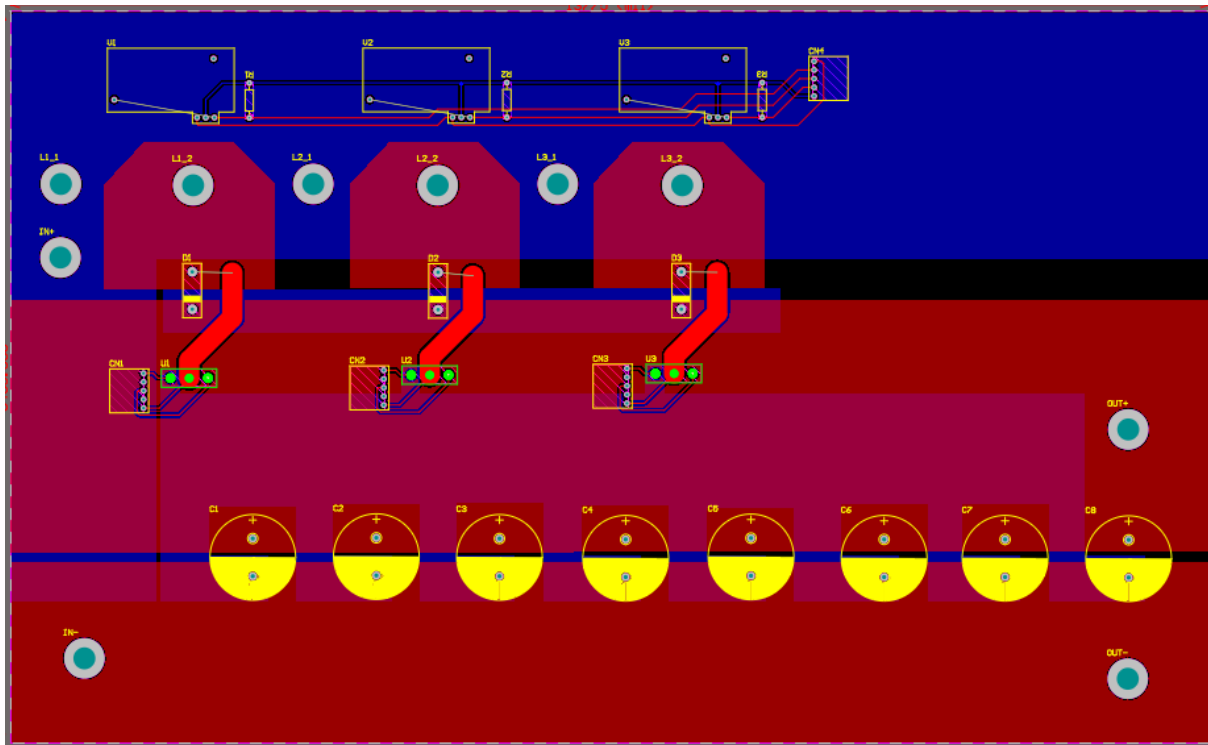


Figura 14 – Esquemático Altium



5.2.2 Implementação do Model Free

Com o ESP32 em mãos, foi definida a entrada de amostras, que, em nosso modelo análogo, será sensível ao sinal do tacômetro do motor elétrico. No modelo real, essa entrada será o tacômetro presente no motor a combustão.

A primeira etapa da implementação do Model Free no ESP32 será a de estipular valores quantitativos de amostras a serem analisadas. Com o intuito de encontrarmos um bom número de amostras para utilizarmos, conversamos com os orientadores e alunos de pós graduação da área, e nos foi orientado a execução da análise de 50 amostras.

A implementação final do Model Free será detalhadamente documentada e apresentada futuramente nesta seção, fornecendo um registro completo do desenvolvimento e dos resultados alcançados neste projeto.

5.2.2.1 Estimador

Com base na discretização do Estimador vista em (2.4.4), observa-se que os termos

$$\frac{60}{T^5} \sum_{k=0}^N a_k \left\{ T^2 - 6TkT_s + 6(kT_s)^2 \right\} y[k] \quad (5.2.11)$$

e

$$\frac{30\hat{a}}{T^5} \sum_{k=0}^N a_k \left\{ (T - kT_s)^2 (kT_s)^2 \right\} u[k] \quad (5.2.12)$$

Podem ser descritos como:

$$\sum_{k=0}^N \frac{60}{T^5} a_k \left\{ T^2 - 6TkT_s + 6(kT_s)^2 \right\} y[k] \quad (5.2.13)$$

e

$$\sum_{k=0}^N \frac{30\hat{a}}{T^5} a_k \left\{ (T - kT_s)^2 (kT_s)^2 \right\} u[k] \quad (5.2.14)$$

Além disso, considerando a independência aos conjuntos de amostras $y[k]$ e $u[k]$, podemos vetorizar a equação (2.4.4) da seguinte forma:

$$\hat{\phi} = \sum_{k=0}^N Y_{est}[k]y[k] + \sum_{k=0}^N U_{est}[k]u[k] \quad (5.2.15)$$

Onde:

$$Y_{est}[k] = \frac{60}{T^5} a_k \{T^2 - 6TkT_s + 6(kT_s)^2\} \quad (5.2.16)$$

e

$$U_{est}[k] = \frac{30\hat{a}}{T^5} a_k \{(T - kT_s)^2 (kT_s)^2\} \quad (5.2.17)$$

Desta forma, é possível calcular e inicializar o vetor de pesos do estimador antes mesmo que a rotina de controle seja iniciada. O processo de cálculo do estimador passa a ser uma somatória da multiplicação entre as amostras e pesos correspondentes.

Optou-se por executar tal cálculo do estimador através de uma janela deslizante de amostras, implementada a partir de um ring-buffer simples por meio de um vetor estático, onde os índices indicando o fim e o início variam conforme amostras novas são inseridas.

É importante observar que as amostras devem ser organizadas de acordo com o instante de coleta; além disso, a medida que o buffer aumenta e eventualmente sobrescreve amostras antigas, é necessário que os índices de início e final do buffer norteiem o somador, para que as amostras sejam multiplicadas pelo peso correspondente a sua posição corrigida dentro do buffer.

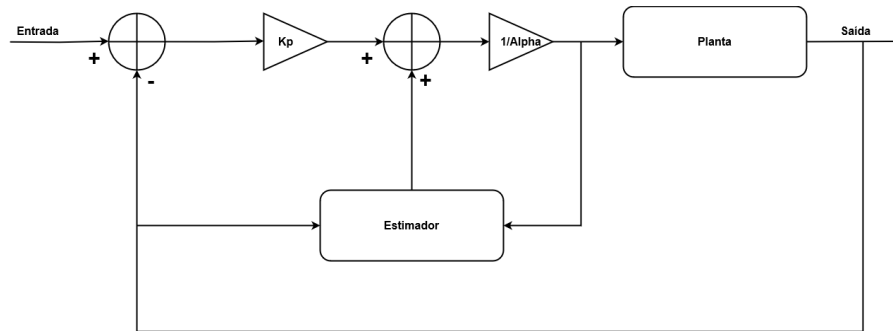
5.2.3 Esquema de Controle

De início, optou-se por utilizar um controle simples do tipo proporcional em adição ao estimador algébrico em razão de dois motivos:

- Reduzimos o overhead sobre a tarefa de controle ao dispensarmos rotinas de diferenciação e integração numéricas.
- O estimador possui um caráter de correção sobre o erro do sistema.

Com isso, se obtém tal sistema básico:

Figura 15 – Esquema Básico de Controle



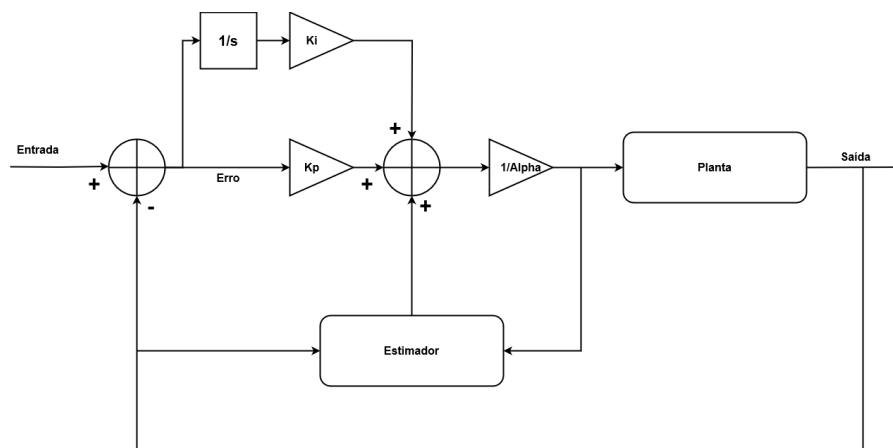
Entretanto, apenas o fator proporcional no controle não apresentou bom desempenho durante a preparação da prova de conceito. Ao aplicar uma força contrária à rotação do motor CC, o controle demorava entre 5 a 10 segundos para apresentar alguma resposta. Além disso, o menor erro estacionário que o grupo conseguiu obter ao calibrar a constante K_p estava na casa dos 15%, medida não considerada satisfatória.

O grupo descartou a possibilidade de limitações de hardware como as causas para este problema pois o microcontrolador escolhido possui especificações extremamente superdimensionadas para esta tarefa. Ademais, ineficiências no código também foram descartadas devido ao uso do RTOS. O mesmo possui prioridades entre suas tasks e a alteração dessas prioridades não resultou em ganhos expressivos na performance do controle.

Por este motivo, foi incluído uma parcela integrativa, o qual resolveu o problema da demora na resposta do controle, porém o sistema ficou instável. É sabido que caso a constante K_i não seja corretamente ajustada, o sinal do sistema pode apresentar overshoot e um período em que o sistema possui oscilação. Porém, mais uma vez, a oscilação não foi consideravelmente reduzida calibrando-se a constante K_i .

A solução encontrada foi implementar técnicas anti-windup.

Figura 16 – Esquema de Controle com Integrador



5.2.4 Técnicas Anti-Windup

Segundo (NETO, 2005) o fenômeno conhecido como Wind-up é uma ocorrência indesejada em sistemas de controle, especialmente naqueles que empregam controladores proporcionais-integrativos. Ele ocorre quando a integral do erro do sistema se acumula de maneira contínua, resultando em um aumento constante do sinal de controle, mesmo quando a saída do sistema atinge o valor desejado. As causas primárias do Wind-up estão relacionadas a limitações físicas ou práticas nos atuadores, que impedem a execução efetiva do sinal de controle gerado pelo componente integral do controlador PID. Este acúmulo excessivo pode ocorrer, por exemplo, durante períodos de saturação no atuador ou quando o sistema está sujeito a restrições físicas. Para mitigar o Wind-up, estratégias como a limitação anti-Wind-up são empregadas, envolvendo a modificação do componente integral do controlador para evitar a acumulação excessiva de energia durante as condições adversas, assegurando uma resposta mais precisa e eficiente do sistema de controle.

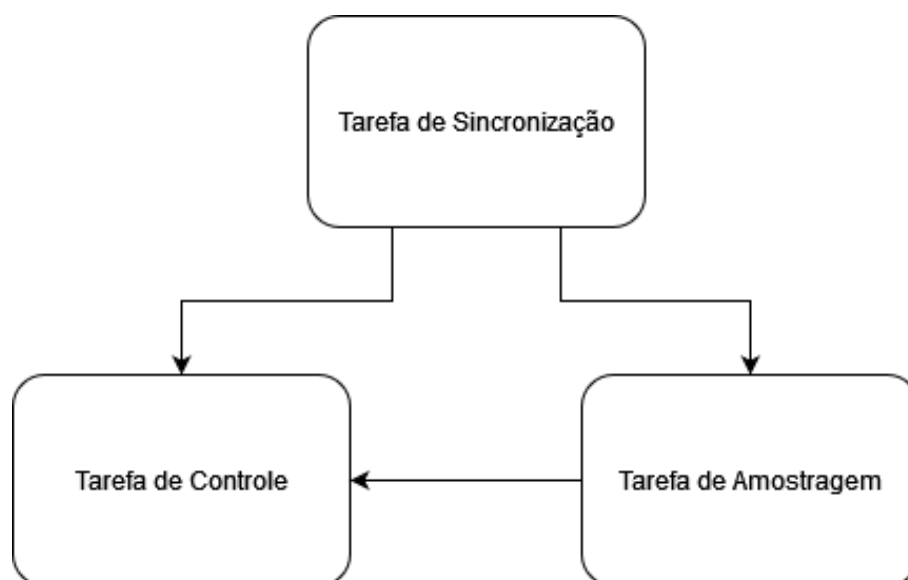
A solução encontrada pelo grupo foi adotar uma técnica de integração condicional, na qual é zerada a componente integral do controle toda vez que o erro fica menor do que 5%. Ou seja, quando o sinal se apresenta suficientemente próximo do setpoint, a parte integral do controle é reiniciado, fazendo cessar a oscilação. Apesar dessa implementação da integração condicional não ser tradicional, o desempenho foi considerado satisfatório frente a grau de complexidade computacional baixo da solução proposta.

5.2.5 Hierarquia de Tarefas

A hierarquia das tarefas foi concebida como uma divisão do funcionamento da ECU em duas partes:

- Amostragem: responsável por receber amostras dos sensores e realizar cálculos para obtenção da rotação do motor.
- Controle: receber os valores de rotação e aplicar tais valores ao controle, resultando em um valor de PWM de abertura da válvula borboleta.
- Sincronização: inicia e coordena as outras tarefas.

Figura 17 – Hierarquia Básica de Tarefas



5.2.6 Prova de Conceito

5.2.6.1 Hardware

Devido à não disponibilidade do motor à combustão Honda 250cc durante a realização deste projeto, foi necessário estabelecer uma prova de conceito para validar o sistema e aferir se ele se comporta conforme o projetado.

O sistema real irá utilizar somente a leitura do sensor CKP como entrada da malha de controle. Isto foi feito pois com apenas sua leitura, já é possível determinar a rotação do motor à combustão ao qual estará acoplado o gerador trifásico. Já a tensão que o gerador irá fornecer ao retificador, que é a saída do sistema. Ela, por sua vez, está diretamente ligada à sua rotação e esta relação de rotação no gerador por tensão gerada já foi mapeada.

Um motor CC genérico com tacômetro foi utilizado para simular o motor à combustão pois o sinal gerado por ele é semelhante ao gerado pelo sensor CKP para efeitos de controle.

O microcontrolador ESP32 lê e calcula a rotação do motor CC à todo momento e gera um sinal PWM de para controlar o ângulo da válvula borboleta. Foi escolhida uma válvula borboleta eletrônica com TPS para simular a válvula borboleta definitiva do motor à combustão que será modificada para também se tornar eletrônica. Como foi explicado anteriormente, o sensor TPS é basicamente um potenciômetro acoplado ao eixo da válvula borboleta, de modo que, ao alimentá-lo com uma tensão, ela irá variar linearmente conforme a válvula for abrindo. Entretanto, no modelo escolhido para a prova de conceito, a alimentação do TPS é isolada da alimentação da válvula borboleta em si e possui tensão de referência igual a 5v. Como o motor CC simulando o motor à combustão opera em 12v, foi necessário converter a leitura gerada pelo TPS em um sinal PWM

variável de 12v linearmente proporcional à ela. Isto foi feito usando um microcontrolador secundário.

Tanto o PWM do motor CC simulando o motor à combustão quanto o PWM do motor CC da válvula borboleta foram gerados utilizando Pontes H.

O objetivo final da prova de conceito foi verificar uma rotação constante no eixo do motor CC independentemente de fatores como torque contrário à sua rotação ou variações em sua tensão de alimentação. Definiu-se um setpoint de rotação e foram aplicadas forças contrárias à ela, bem como variações no gerador de bancada utilizado para alimentar o sistema. Com isso, a rotação no eixo do motor CC diminuiu em certa medida. Esta diminuição foi calculada pelo ESP32, que, por sua vez, aumentou Duty Cycle do PWM de controle do ângulo da válvula borboleta, fazendo-a abrir um pouco mais. Com isso, a tensão da leitura do TPS aumentou, fazendo o microcontrolador secundário aumentar o PWM de saída na mesma medida. Este PWM é o que alimenta o motor CC simulando o motor à combustão, então sua rotação torna a subir para o setpoint novamente.

Com esta demonstração, foi possível comprovar o funcionamento do sistema, que poderá ser aplicado no motor Honda 250cc no futuro para obter o mesmo funcionamento.

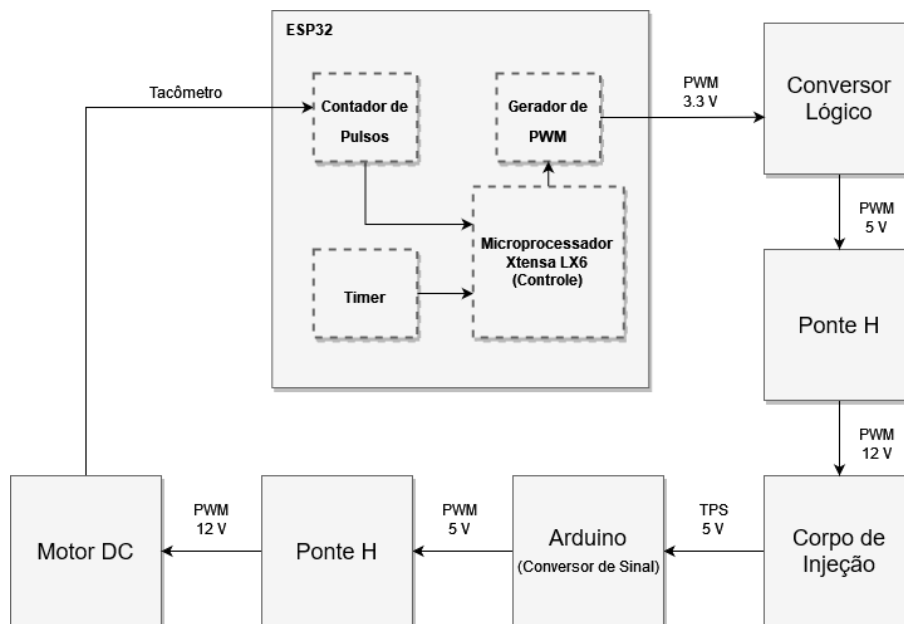


Figura 18 – Diagrama da Prova de Conceito

5.2.6.2 Software

O RTOS garante a execução determinística das tarefas, isso traz previsibilidade ao software, porém também cria a possibilidade de deadlocks e task starvation. Tais problemas também são determinísticos e portanto são frutos da organização das tarefas desenvolvida

pelo projetista. O método escolhido para conservar as prioridades das duas tarefas e evitar tais comportamentos indesejáveis foi de uma fila de comunicação.

Filas em RTOS são estruturas de dados utilizadas para enviar mensagens entre tarefas sem a necessidade de alterar threads. Além uma forma de comunicação entre tarefas, a tentativa de leitura de uma fila vazia por uma tarefa pode bloquear a execução de tal, ou seja, filas também podem ser elementos de ordenamento de execução entre as tarefas.

Em relação à implementação no projeto, uma fila é usada para enviar o estimador calculado da tarefa de amostragem para controle. Desse modo, a amostragem torna-se bloqueante em relação ao controle, garantindo a coleta da amostra antes da execução do controle.

O sistema de controle em software é inicializado através de uma tarefa de sincronização, que por sua vez inicializa duas tarefas: uma de controle e outra de amostragem, além de inicializar as filas de comunicação e repassar os ponteiros.

A tarefa de amostragem espera um determinado tempo através do temporizador interno e, esgotando o tempo, recebe o valor do contador de pulsos ligado ao tacômetro, o valor do estimador é calculado com o estado anterior dos buffers circulares e o número de pulsos é convertido em um valor de frequência; tal valor é justamente a saída da planta e portanto é inserido no buffer circular correspondente. O valor do estimador é enviado para a tarefa de controle através da fila descrita anteriormente. Tal método garante que a amostragem bloqueie a tarefa de controle até que as amostras estejam prontas.

A tarefa de controle é onde de fato o model-free é implementado. Obtemos o erro subtraindo o valor de saída do setpoint, integramos tal erro através de um acumulador e finalmente somamos ao estimador; a saída é saturada para garantir um valor maior que zero e limitada a resolução do PWM, resultando na saída final de controle e sua inserção no buffer correspondente.

Como um adendo, foi notado que a diminuição de prioridade da tarefa de controle levou a resultados melhores; possivelmente tal "relaxamento" do controle permite que o sistema se ajuste as mudanças antes dos controle, ocasionando em menor overshooting.

Figura 19 – Detalhamento do Software

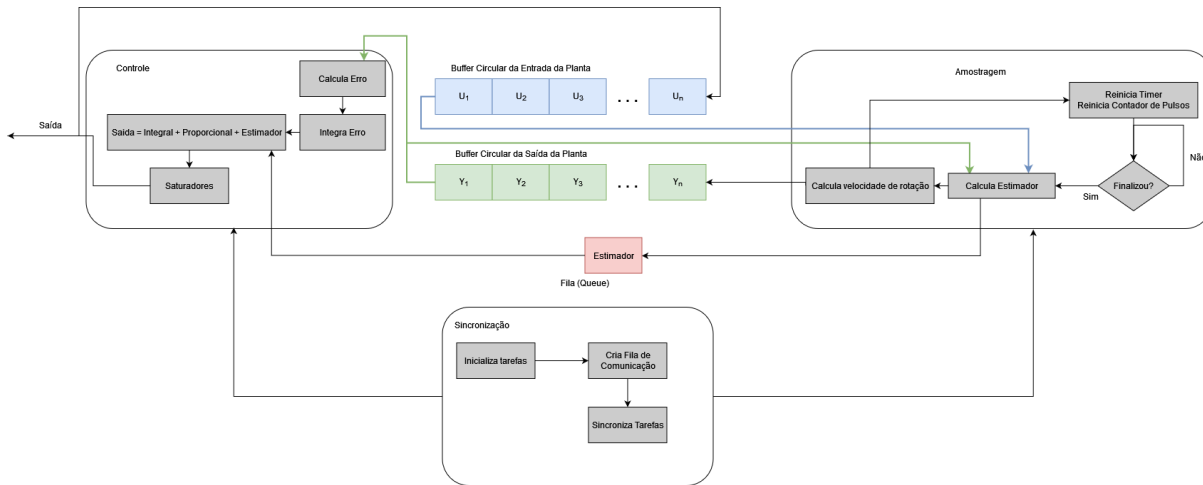


Figura 20 – Detalhamento do Software

5.3 Testes e Avaliação

Os testes a serem feitos futuramente seguirão os seguintes requisitos listados:

- 1. Validação do correto funcionamento do armazenamento de amostras pelo software.
- 2. Validação do correto funcionamento do controle Model Free e sua interação com as amostras armazenadas pelo software.
- 3. Validação da correta amostragem dos dados fornecidos pelo tacômetro.
- 4. Validação do correto controle da válvula borboleta pelo software.
- 5. Validação geral do funcionamento do sistema como um todo, e da interação entre as alterações do padrão de rotação do motor CC e o acionamento da válvula borboleta por parte do controle gerenciado pelo software.

6 Considerações Finais

6.1 Conclusões do Projeto de Formatura

A prova de conceito proposta consiste em controlar a rotação de um motor de corrente contínua por meio de um microcontrolador, intermediado por uma válvula borboleta, tentando ao máximo replicar o funcionamento de um sistema à combustão. A aproximação inicial de realizar o controle do tipo model-free apenas com ganho proporcional provou-se relativamente bem-sucedida, o setpoint de 1000Hz foi atingido pelo sistema na presença de resistência no eixo do motor, porém a velocidade de resposta foi insatisfatória. Tal velocidade de resposta pode ser vista no gráfico:

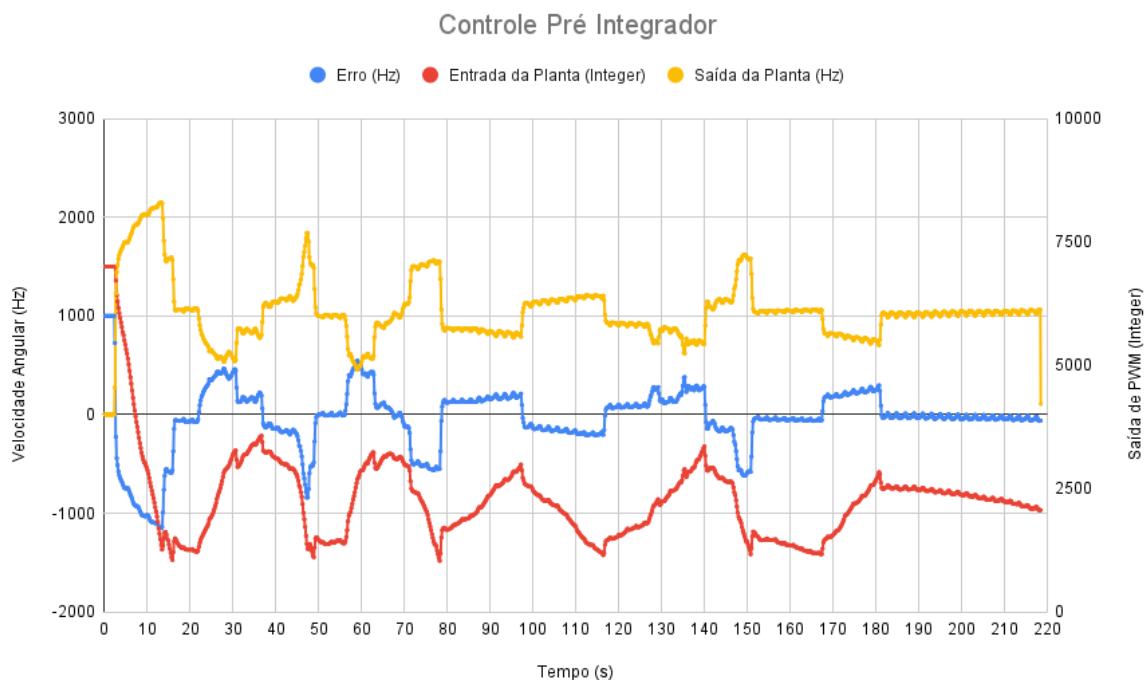


Figura 21 – Resultados do Controle Pré Integrador

A duração relativamente longa (aproximadamente 20 segundos) de velocidades anômalas evidencia a lentidão do sistema em responder ao distúrbio.

Posteriormente, a adição do integrador e o sistema anti-windup descritos anteriormente produziu os seguintes resultados:

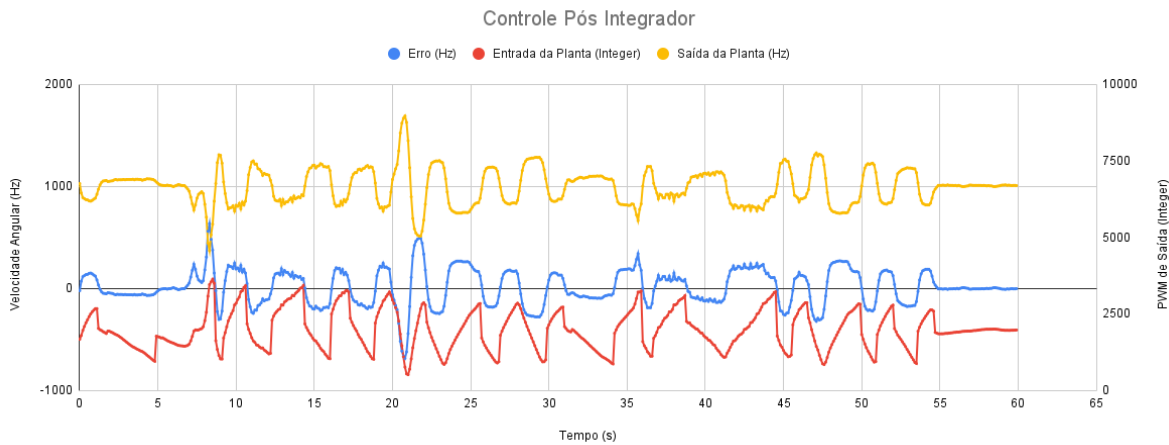


Figura 22 – Resultados do Controle Pós Integrador

Nota-se aqui que a resposta é muito mais rápida que a anterior, em uma razão aproximada de dez vezes. Consideramos tal resultado satisfatório para esta prova de conceito.

Embora com nosso sistema análogo tenhamos alcançado os objetivos traçados para este trabalho, certos percalços impossibilitaram partes que seriam de bom uso para o projeto como um todo. A não disponibilidade do motor a combustão, por exemplo, impossibilitou a obtenção de sua curva característica de eficiência, que seria então utilizada para se explorar seu ponto de rotação ideal.

Ao se obter tal dado, teríamos a capacidade de alimentar o projeto do Veículo Urbano Leve Híbrido Flex com informações substanciais para melhor aproveitamento da eficiência energética do motor, afim de combiná-la a uma rotação de interesse no gerador, por meio de uma caixa de redução adequada.

O motor a combustão indisponível, por conta de um contratempo com uma instituição parceira do projeto, também impossibilitou a montagem do sistema real, fazendo-se assim necessário o sistema análogo. Apesar do sistema análogo contar com um sensor CKP praticamente idêntico ao presente no motor a combustão, proporcionando similaridades enormes entre o modelo análogo e o sistema real, seria muito mais satisfatória a montagem do sistema real por nosso grupo.

No cálculo do projeto, alcançamos o objetivo de controlar o sistema composto pela válvula borboleta e pelo motor CC a partir de um RTOS, administrado por um ESP32, dotado de um controle Model Free. Assim, concluímos satisfatoriamente todos os testes e avaliações propostas no item 5.3.

6.2 Contribuições

Demanda, mercado, procura, incentivo e investimento são palavras muito recorrentes no vocabulário de notícias a respeito de veículos híbridos. Apenas durante o desenvolvimento dessa pesquisa, foram feitos os seguintes anúncios de investimentos em desenvolvimento, pesquisa e produção de veículos híbridos no Brasil:

- Stelantis: R\$ 2,5 bilhões (22/09/2023).
- Volkswagen: R\$ 5,5 bilhões (05/09/2023).
- Toyota: R\$ 1,7 bilhões (19/04/2023).
- GWM: R\$ 10 bilhões (28/04/2023).
- BYD: R\$ 3 bilhões (04/07/2023).

Soma-se assim um montante superior a 20 bilhões em investimentos, indicando claramente um ponto de virada muito próximo para os veículos híbridos se popularizarem no Brasil. O governo vai no mesmo sentido, ao proporcionar incentivos tanto aos consumidores quanto aos produtores de veículos híbridos.

Tudo isso demonstra a necessidade da contribuição científica por parte da comunidade acadêmica para com a sociedade civil, carência essa que é ponto de ação do projeto do Veículo Urbano Leve Híbrido Flex, coordenado na USP pelo Professor Dr. Armando Antonio Maria Laganá, que conta com a atuação de diversos departamentos de diversas universidades no Brasil.

A pesquisa apresentada representa uma significativa contribuição a este projeto, ao se desenvolver o sistema de controle da válvula borboleta, empregando uma abordagem de controle Model Free, como também o retificador Boost Interleaved.

A relevância desse avanço científico é notável, especialmente considerando o rápido crescimento do mercado ao qual ele se destina. Em meio a uma variedade de programas voltados para a adaptação à mobilidade urbana, destaca-se o ROTA 2030, financiador dessa pesquisa, que visa elevar os padrões de eficiência energética dos veículos no Brasil, possibilitando a redução dos impactos ambientais.

No contexto do ROTA 2030, a pesquisa e o projeto abordam parâmetros essenciais que são cruciais para atender aos requisitos de eficiência energética e sustentabilidade no setor automotivo. O programa já implementou uma melhoria de 12% na eficiência dos atuais motores a combustão vendidos no Brasil, e deve fomentar o mercado até seu último ciclo, que durará entre 2028 e 2032, visando equiparar as tecnologias automotivas nacionais às internacionais, incluindo as tecnologias de veículos híbridos.

O emprego do método de controle Model Free para gerenciar o sistema é uma inovação significativa. Este não só contribui para o atual projeto do Veículo Urbano Leve Híbrido Flex, mas também abre portas para sua aplicação em outros veículos híbridos. Os dados, pesquisas e aplicações desenvolvidos neste trabalho proporcionam uma base sólida para a implementação bem-sucedida desse método em futuros projetos, consolidando assim uma contribuição duradoura para o avanço da tecnologia automotiva sustentável no Brasil, podendo até auxiliar o desenvolvimento internacional de tais tecnologias.

6.3 Perspectivas de Continuidade

Como foi citado anteriormente, este projeto está inserido em um contexto muito maior, conta com a participação de equipes de outras instituições e é financiado pelo programa Rota 2030. Ele prevê o desenvolvimento de um veículo urbano leve híbrido flex por inteiro. Portanto, este trabalho relata uma pequena parcela do desenvolvimento deste veículo e que, diga-se de passagem, está em sua fase inicial.

O primeiro protótipo do veículo, do qual este trabalho faz parte, foi pensado para conter de início apenas componentes de mercado, para agilizar o desenvolvimento e validar possíveis provas de conceito.

A equipe que assumir o projeto no futuro poderá focar em projetar um controlador unificando todas as funcionalidades do subsistema de geração: Controle da rotação do motor à combustão e controle do circuito boost-interleaved.

Além disso, uma placa única para o retificador, já englobando os drivers e componentes que neste projeto ficaram externos à PCB (ponte retificadora e indutores) pode ser produzida, dando um maior grau de integração ao sistema.

Já os trabalhos mais imediatos que podem ser realizados como continuação deste projeto de formatura serão a automatização da válvula borboleta original do motor à combustão. Na aplicação original do motor, o ângulo responde ao acionamento do acelerador da moto, operado mecanicamente através de um cabo pelo motorista. O sistema será automatizado de forma que o ângulo da válvula borboleta passe a ser manipulado de forma autônoma por meio de um motor de corrente contínua que rotaciona uma polia, liberando ou recolhendo o cabo do acelerador.

Quando a montagem da válvula borboleta automatizada for concluída, obrigatoriamente a calibração do controle Model-Free terá que ser refeita para se adaptar melhor à nova configuração. Neste momento, também cabe o teste utilizando outras formas de controle mais tradicionais com o objetivo de comparar os resultados e escolher o que performar melhor para a aplicação em questão.

Ademais, com o motor em mãos, será de grande proveito a obtenção da curva

característica de eficiência energética do motor, podendo-se obter sua rotação ideal. Com tal dado em mãos, poderá ser calculada uma caixa de redução entre o motor a combustão e o gerador, para se adequar a rotação mais eficiente do motor a rotação necessária no gerador para manutenção de sua tensão no valor correto. De imediato, essa ação traria enorme economia energética ao sistema.

Referências

- BUTTAZZO, G. *Hard Real-Time Computing Systems: Predictable Scheduling Algorithms and Applications - Second Edition, Springer 2005*. [S.l.: s.n.], 2011. v. 24. ISBN 978-1-4614-0675-4. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.
- CHAN, C. The state of the art of electric and hybrid vehicles. *Proceedings of the IEEE*, v. 90, n. 2, p. 247–275, 2002. Citado na página 24.
- CORUH, N. et al. A simple and efficient implementation of interleaved boost converter. *Proceedings of the 2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2011*, p. 2364–2368, 06 2011. Citado na página 32.
- FLIESS, M.; JOIN, C. Model-free control. *International Journal of Control*, v. 86, 05 2013. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 35.
- LAPLANTE, P.; OVASKA, S. Real-time systems design and analysis: Tools for the practitioner. *Real-Time Systems Design and Analysis: Tools for the Practitioner*, 11 2011. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.
- LIU, W. *Hybrid Electric Vehicle System Modeling and Control*. John Wiley & Sons, Incorporated, 2017. (Automotive series). ISBN 9781119278924. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=3MMwtAEACAAJ>>. Citado 3 vezes nas páginas 23, 24 e 38.
- MAYER, R.; PÉRES, A.; OLIVEIRA, S. V. Conversor cc-cc multifásico bidirecional em corrente não isolado aplicado a sistemas elétricos de tração de veículos elétricos e híbridos. (multiphase bidirectional dc/dc non-isolated converter for electric drive system in electric vehicle and hybrid electric vehicle). *Revista interamericana de radiología*, v. 20, 08 2015. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 47.
- NETO, A. H. Técnicas anti-windup em estruturas de controle pid, rst e gpc. In: . [s.n.], 2005. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:56908598>>. Citado na página 54.
- NEVES, G. Pereira das; ANGÉLICO, B. A. Model-free control of mechatronic systems based on algebraic estimation. *Asian Journal of Control*, v. 24, n. 4, p. 1575–1584, 2022. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/asjc.2596>>. Citado na página 35.
- POWERS, W. F.; NICASTRI, P. R. Automotive vehicle control challenges in the 21st century. *Control Engineering Practice*, v. 8, n. 6, p. 605–618, 2000. ISSN 0967-0661. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066199001999>>. Citado na página 23.
- YANG, S.; LU, Y.; LI, S. An overview on vehicle dynamics. *International Journal of Dynamics and Control*, v. 1, n. 4, p. 385–395, dec 2013. Citado na página 23.